Appunti di Elettronica
Capitolo 4
Circuiti raddrizzatori e alimentatori

Introduzione

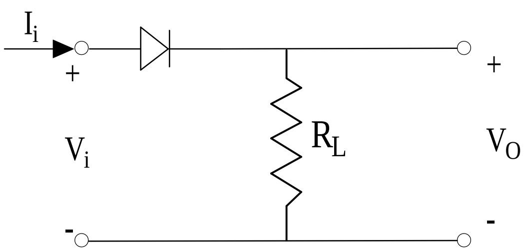
Abbiamo in precedenza descritto i cosiddetti **circuiti limitatori di tensione**: si tratta di circuiti che, sfruttando la conduttanza molto elevata dei diodi in conduzione, riescono a mantenere praticamente costante la tensione in uscita nonostante ci siano variazioni anche consistenti (sia pure entro certi limiti) della tensione in ingresso. Questi circuiti sfruttano anche il fatto per cui, quando un diodo è spento, ossia quando la tensione applicata ai suoi capi è inferiore alla tensione di accensione V_γ, la corrente che il diodo lascia passare è molto bassa, praticamente nulla. Questa caratteristica viene anche utilizzata in altri circuiti, che prendono il nome di **circuiti raddrizzatori**: in essi, *il diodo ha l'effetto di lasciare invariata la forma d'onda della tensione in ingresso quando essa è positiva e, invece, di abbatterla (oppure, in casi particolari, di ribaltarla) quando essa è negativa.*

Vogliamo allora studiare il funzionamento e le prestazioni dei **circuiti raddrizzatori impieganti diodi**. In particolare, vedremo più avanti come questi circuiti vengano impiegati nei cosiddetti **circuiti alimentatori**.

Circuiti raddrizzatori

Raddrizzatore a singola semionda

Un semplice esempio di **circuito raddrizzatore a diodi** è riportato nella figura seguente:



Si osserva immediatamente che *il circuito riportato è identico ad un circuito limitatore di tensione, con la differenza, però, che la tensione di uscita è in questo caso prelevata ai capi del resistore e non più ai capi del diodo.*

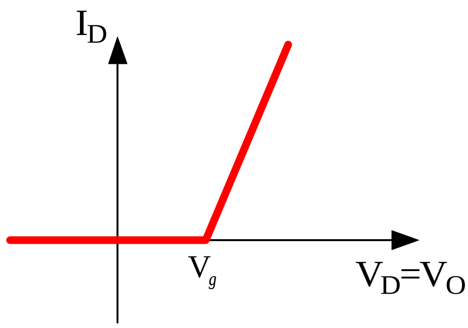
Così come abbiamo fatto per i circuiti limitatori, ci interessa determinare la *caratteristica statica ingresso-uscita in tensione* di questo circuito, ossia il legame tra la tensione in ingresso e quella in uscita. Ancora una volta, possiamo procedere inizialmente per via essenzialmente intuitiva, mentre successivamente cercheremo conferma delle conclusioni ottenute mediante metodi formali più rigorosi.

Anche in questo caso, è evidente che il comportamento del circuito dipende dal fatto che il diodo sia acceso o spento.

La prima possibilità è che la tensione ai capi del diodo sia inferiore alla tensione di accensione V_γ del diodo stesso: in questo caso, il diodo è spento, per cui non lascia passare corrente; se non passa corrente, la caduta di tensione sul resistore è nulla, ossia è nulla la tensione di uscita; possiamo dunque cominciare a scrivere che

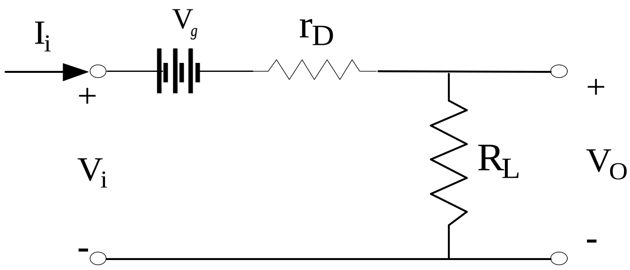
$$\text{per } V_i < V_\gamma \quad \longrightarrow \quad V_O = 0$$

Viceversa, nel momento in cui la tensione in ingresso eguaglia la tensione di accensione V_γ, il diodo passa in conduzione e lascia passare corrente nel circuito; il valore di tale corrente dipende da quale comportamento viene assunto per il diodo. Allora, per caratterizzare il comportamento del diodo, usiamo la seguente caratteristica lineare a pezzi:



Si tratta, ovviamente, di una via di mezzo tra la caratteristica ideale e quella reale: infatti, così come nel caso ideale, il diodo presenta una corrente nulla e una conduttanza g_D nulla quando è spento; viceversa, in modo molto simile al caso reale, esso presenta una conduttanza g_D finita (ed elevata, come testimonia la pendenza di quella retta) quando è acceso.

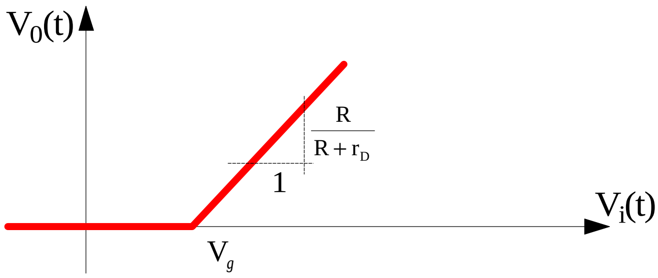
Questa caratteristica, relativa ai valori di tensione superiori a V_γ, equivale a considerare il diodo equivalente ad una serie tra una batteria di tensione V_γ e un resistore di resistenza $r_D=1/g_D$, per cui, <u>quando il diodo si trova il conduzione</u>, il circuito da considerare è il seguente:



Da questo circuito, applicando per esempio la sovrapposizione degli effetti (cioè considerando prima $V_\gamma=0$ e poi $V_i=0$), è immediato ricavare che la tensione in uscita vale

$$\text{per } V_i \geq V_g \quad \longrightarrow \quad V_O = \frac{R}{R+r_D}V_i + \left(-\frac{R}{R+r_D}V_g\right)$$

Possiamo dunque rappresentare la caratteristica di trasferimento del circuito raddrizzatore nel modo seguente:



La cosa interessante da notare riguarda la pendenza del tratto di curva obliquo: tale pendenza vale $\frac{R}{R+r_D}$ ed è abbastanza prossima ad 1 (cioè l'inclinazione è di 45°), visto che la resistenza del diodo, in conduzione, è generalmente molto bassa rispetto ad R. Di conseguenza, la retta è inclinata a circa 45°, il che significa che, per $V_i>V_\gamma$, la tensione di uscita riproduce esattamente o quasi la tensione in ingresso.

Possiamo dunque concludere che il comportamento del circuito è il seguente: *quando la tensione in ingresso è minore di V_g, la tensione in uscita viene azzerata; quando la tensione in ingresso è uguale o maggiore di V_g, la tensione in uscita è praticamente uguale alla tensione in ingresso.*

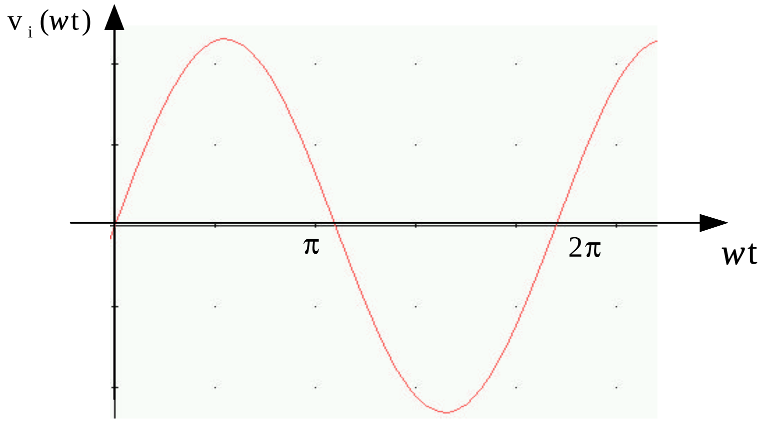
Simulazioni al calcolatore

Usando un diodo con tensione di accensione V_γ=0.511(V), le simulazioni mostrano una caratteristica di trasferimento fatta nel modo seguente:

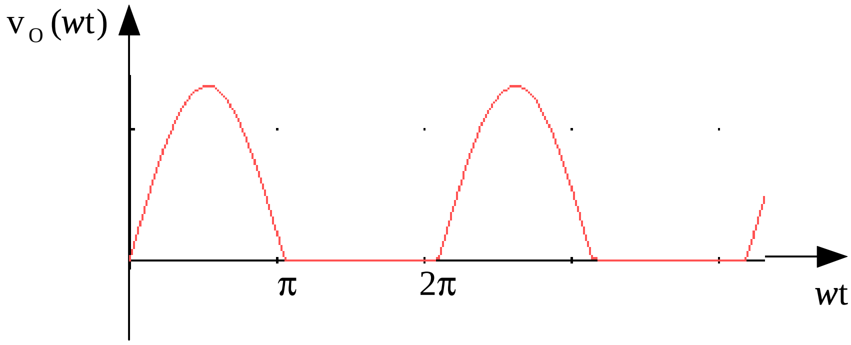
- la tensione V_L ai capi del resistore di carico R_L (preso da 1kΩ) è praticamente nulla per valori della tensione in ingresso inferiori a V_γ;
- per valori della tensione di ingresso V_{IN} superiori al valore della tensione di accensione del diodo, la tensione V_L cresce linearmente con la tensione di ingresso, secondo un coefficiente pari a circa 0.88: accade cioè che $V_L=0.88V_{IN}$.

Impiego di un raddrizzatore su una tensione sinusoidale

Il comportamento del circuito descritto nel paragrafo precedente viene sfruttato, in particolare, quando la tensione in ingresso è una tensione sinusoidale del tipo seguente:



L'effetto ottenuto dal circuito, come vedremo tra un attimo nei dettagli, è quello di azzerare le porzioni di forma d'onda corrispondenti a tensioni inferiori alla V_γ del diodo, in modo da ottenere una tensione di uscita fatta nel modo seguente:



Questo grafico è però approssimato, in quanto c'è una cosa importante da sottolineare: i valori dell'angolo ωt (misurato in radianti) in corrispondenza del quale la tensione di uscita viene azzerata non sono precisamente i multipli di π, ossia gli stessi angoli in corrispondenza dei quali si annulla la tensione di ingresso; al contrario, si tratta degli angoli in corrispondenza dei quali la tensione in ingresso scende al di sotto della V_γ. Quindi, ***la tensione di uscita è identica a quella di ingresso solo quando quest'ultima supera la V_g;*** al contrario, la tensione di uscita è identicamente nulla quando $v_{IN}(t)<V_\gamma$.

Naturalmente, considerando che, nella maggior parte delle applicazioni, il valore massimo assunto dalla tensione in ingresso è abbastanza maggiore del valore di V_γ (che è quasi sempre dell'ordine di 0.6V), il fatto che la tensione si annulli poco prima di π e "riparta", per così dire, poco dopo 2π, è praticamente impercettibile. Dove, invece, il valore massimo della tensione in ingresso è confrontabile con V_γ, allora la cosa risulta più evidente.

Infine, ricordiamo che un circuito come quello appena esaminato si definisce propriamente **raddrizzatore a singola semionda** in quanto esso azzera semplicemente la forma d'onda negativa. Vedremo, invece, più avanti come si comporta un *raddrizzatore a doppia semionda*, il quale, anziché azzerare la forma d'onda negativa, la ribalta completamente, facendola diventare positiva.

Simulazioni al calcolatore

Usando un diodo con tensione di accensione V_γ=0.511(V) (ed una tensione di rottura teoricamente infinita), prendendo come alimentazione una forma d'onda del tipo $E_M \sin(2\pi f t)$ (dove l'ampiezza è E_M=12V, mentre la frequenza è f=50Hz, il che corrisponde ad un periodo di 20ms, cioè a una oscillazione ogni 20ms), le simulazioni mostrano una tensione di uscita V_{OUT} praticamente identica a quella di ingresso V_{IN}, tranne per tre cose:

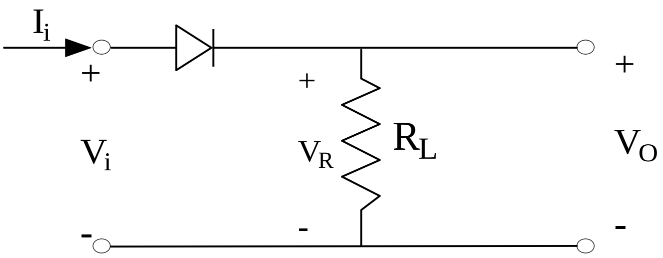
- la prima è, come abbiamo detto, il fatto di essere identicamente nulla quando V_{IN} è negativa;
- la seconda è che il picco di V_{OUT} è approssimativamente pari al picco di V_{IN} diminuito di 0.25V;
- la terza è che $V_{OUT}(t)$ si azzera con circa 0.88msec di differenza (in anticipo o in ritardo) rispetto alla $V_{IN}(t)$.

Circuiti alimentatori

Analisi delle prestazioni di un circuito raddrizzatore a singola semionda

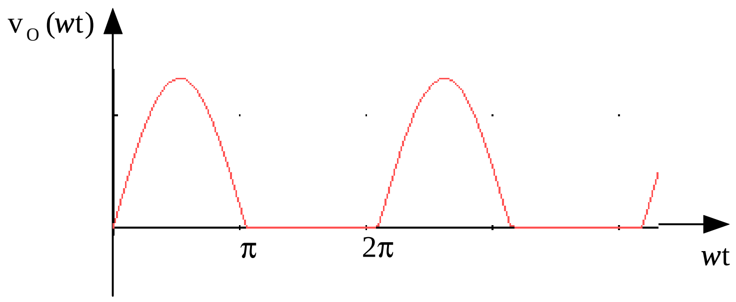
Quella di sopprimere le semionde negative di una tensione sinusoidale è tutto sommato una applicazione molto semplice di un circuito raddrizzatore. In realtà, avendo a che fare con tensioni di ingresso di tipo sinusoidale, l’applicazione principale che viene effettuata con questi circuiti è quella di “trasformare” queste tensioni sinusoidali in tensioni continue o approssimativamente continue. Questo è infatti quello che viene fatto nei cosiddetti “alimentatori”: un **alimentatore** è un circuito analogico che riceve in ingresso una tensione alternata ([1]) e, dopo averla opportunamente “scalata” (ossia dopo averne ridotto l’ampiezza) per mezzo di un **trasformatore**, la converte in una tensione continua. Vogliamo allora vedere *come va realizzato un circuito raddrizzatore in modo che “trasformi” una tensione alternata in una tensione continua.*

Per fare questo, cominciamo con l’analizzare, anche da un punto di vista numerico, ciò che succede in un circuito raddrizzatore del tipo considerato prima e qui di seguito riportato per comodità:



Supponiamo che la tensione in ingresso sia una forma d’onda sinusoidale del tipo $v_i(t) = V_M \sin(\omega t)$, dove ovviamente $\omega=2\pi f$ è la pulsazione angolare dell’onda e f la frequenza (che porremo nei calcoli uguale a 50Hz).

Abbiamo detto che la forma d’onda della tensione ai capi del carico R_L è fatta nel modo seguente:



Questa forma d’onda è, in prima approssimazione, identica a quella in ingresso, salvo ovviamente la mancanza dei tratti per tensioni negative. Inoltre, la forma

[1] Ad esempio, la tensione di alimentazione fornita alle abitazioni, la quale ha una frequenza di 50Hz, una ampiezza di 314V e un valore efficace di 220V

d'onda della corrente che fluisce nel carico (e anche nel diodo) è uguale a quella, salvo ovviamente la presenza di un coefficiente di proporzionalità pari ad R_L.

Possiamo calcolare la **corrente media che fluisce nel carico in un periodo** (ossia in un intervallo di valori di ωt che, in questo caso, ha ampiezza 2π): per definizione, abbiamo che

$$I_{DC} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_L(\omega t)\,d\omega t$$

Considerando come è fatta la forma d'onda della corrente i_L, quella integrazione può anche essere ristretta al solo intervallo $(0,\pi)$, in quanto nell'intervallo $(\pi,2\pi)$ la corrente vale zero: possiamo dunque scrivere che

$$I_{DC} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} i_L(\omega t)\,d\omega t = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} I_M \sin(\omega t)\,d\omega t = \frac{I_M}{\pi}$$

dove ovviamente si è posto $I_M=V_M/R$ nell'ipotesi di trascurare la resistenza del diodo.

Considerando che π=3.14, si nota che il valore di I_{DC} è un valore piuttosto basso (approssimativamente un terzo) rispetto al valore di picco I_M della corrente di alimentazione: ciò significa che, *se vogliamo erogare al carico una corrente sufficientemente elevata durante ciascun periodo di tempo, dobbiamo necessariamente aumentare il valore di I_M, ossia dobbiamo spendere maggiore potenza.*

Un discorso ovviamente analogo possiamo fare per la tensione media ai capi del carico durante un periodo: essa vale infatti

$$V_{DC} = I_{DC}R = \frac{RI_M}{\pi} = \frac{V_M}{\pi}$$

In definitiva, quindi, per fornire una certa quantità di energia al carico, abbiamo necessità di aumentare il valore di V_M:

$$P_{DC} = V_{DC}I_{DC} = \frac{V_M}{\pi}\frac{I_M}{\pi}$$

Questo aumento di V_M (o, ciò che è lo stesso, di I_M), però, presenta una sostanziale controindicazione, che riguarda le sollecitazioni cui è soggetto il diodo:

- in primo luogo, aumentare I_M significa aumentare non solo la corrente che fluisce nel carico, ma anche quella che fluisce nel diodo, visto che i due elementi sono in serie; dato che il diodo può tollerare un certo valore massimo di corrente diretta, è chiaro che il valore di I_M va mantenuto entro certi limiti per evitare che il diodo si bruci quando è in conduzione;

- in secondo luogo, anche *la V_M va tenuta entro certi limiti, in quanto essa rappresenta, tra le altre cose, la massima tensione inversa applicata al diodo:* se questa tensione inversa supera la *tensione di breakdown* del diodo, è chiaro che il circuito perde ogni efficacia in quanto il diodo diventa inutilizzabile.

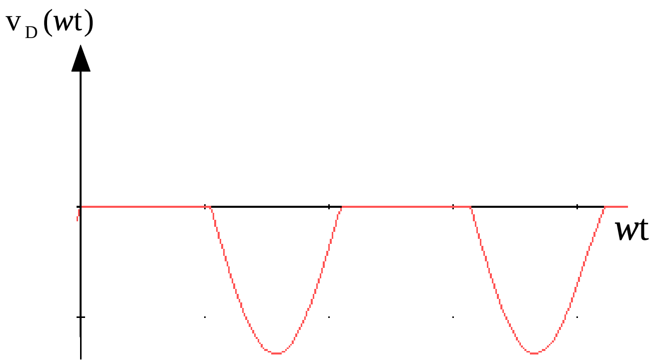
Osservazione

Il fatto che la tensione V_M costituisca la massima tensione inversa applicata ai capi del diodo è abbastanza intuitivo, ma si può ricavare anche in modo rigoroso.

Intuitivamente, è logico che, se la tensione in ingresso è sinusoidale mentre quella in uscita è identica ad essa tranne che per il fatto di non presentare la parte negativa, è ovvio che questa “parte negativa” di tensione dovrà essere necessariamente localizzata ai capi del diodo.

Da un punto di vista più matematico, applicando la legge di Kirchoff delle tensioni abbiamo che $v_D(t) = v_i(t) - v_L(t)$.

Considerando che le due forme d'onda $v_i(t)$ e $v_L(t)$ sono approssimativamente identiche, salvo il fatto che la $v_L(t)$ non presenta la parte negativa di $v_i(t)$, è chiaro che la tensione ai capi del diodo ha un andamento temporale del tipo seguente:



Questo grafico andrebbe in realtà perfezionato tenendo conto che, quando la $V_{IN}(t)$ è positiva, la $v_D(t)$ si assesta sul valore V_γ ed anche che sul diodo c'è una certa caduta di tensione.

Fatte queste considerazioni circa l'aumento di V_M e quindi di I_M, proviamo adesso a calcolare un altro indice di prestazione del circuito e cioè il **valore efficace** della corrente che fluisce attraverso il carico: applicando la definizione, abbiamo tale valore efficace è dato da

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_L^2(\omega t)d\omega t}$$

dove “rms” sta per “root mean square”.

Tenendo conto anche qui del fatto che, nell'intervallo $(\pi,2\pi)$, la corrente vale zero, possiamo restringere l'integrazione all'intervallo $(0,2\pi)$, per cui

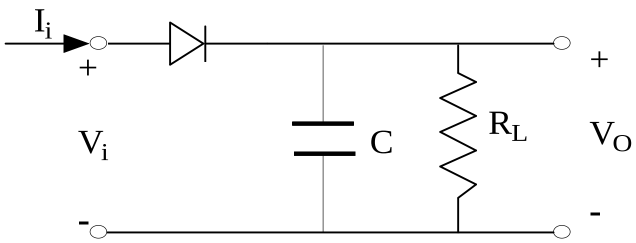
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} i_L^2(\omega t)d\omega t} = \frac{I_M}{2}$$

Abbiamo dunque trovato che, mentre la I_{DC} (corrente media nel carico) è circa un terzo di I_M, il valore efficace della corrente nel diodo è circa la metà di I_M, ossia un valore maggiore di I_{DC}.

Il fatto che I_{rms} sia maggiore di I_{DC} è positivo per l'efficienza del circuito, ma, in effetti, non ci porta un grande guadagno in termini di prestazioni. Dobbiamo allora pensare a qualche altro componente da inserire nel circuito al fine di migliorarne le prestazioni.

Inserimento di una capacità nel circuito raddrizzatore

Nell'ottica di quanto detto circa le scarse prestazioni di un circuito raddrizzatore fatto come quello esaminato nei paragrafi precedenti, vediamo come cambiano le cose se inseriamo, in parallelo al carico R_L, un condensatore lineare tempo-invariante di capacità C:

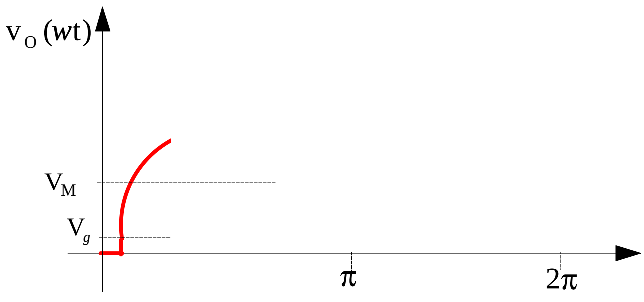


E' subito intuitivo aspettarsi che questo condensatore modifichi profondamente il comportamento del circuito visto prima: infatti, esso introduce nel circuito una **costante di tempo**, determinando così un comportamento dinamico radicalmente diverso dal *comportamento statico* esaminato fino ad ora.

Analizziamo allora da un punto di vista qualitativo il comportamento di questo circuito.

La forma d'onda della tensione in ingresso è ancora una volta quella sinusoidale vista in precedenza. Supponiamo di partire da una condizione iniziale in cui la tensione in ingresso vale 0 a t=0 e il condensatore è ancora scarico. A questo punto, la forma d'onda della tensione $v_i(\omega t)$ prende a salire. Come detto prima, finché la tensione ai capi del diodo è al di sotto della V_γ, il diodo rimane spento: di conseguenza, nel ramo del carico e del condensatore non fluisce corrente, per cui la tensione di uscita è nulla, mentre la tensione ai capi del diodo è esattamente pari alla tensione in ingresso.

Arriva poi il momento in cui la tensione $v_i(\omega t)$ eguaglia il valore V_γ: a questo punto, il diodo si accende e va in conduzione, mantenendo approssimativamente costante ai suoi capi la tensione V_γ; andando in conduzione, esso lascia passare corrente e questa corrente si ripartisce tra il condensatore ed il carico, i quali sono in parallelo: questa corrente fa' sì che la tensione ai capi di questo parallelo prenda a seguire la tensione in ingresso (salvo la piccola caduta di tensione sul diodo), per cui possiamo cominciare a disegnare l'andamento della tensione di uscita nel modo seguente:



Quindi, mentre il diodo è in conduzione (a tensione approssimativamente costante e pari a V_γ), la situazione è del tutto analoga a quella esaminata quando mancava il condensatore; la differenza, le cui conseguenze saranno chiare tra un attimo, è nel fatto che è partito un processo di **carica** del condensatore stesso.

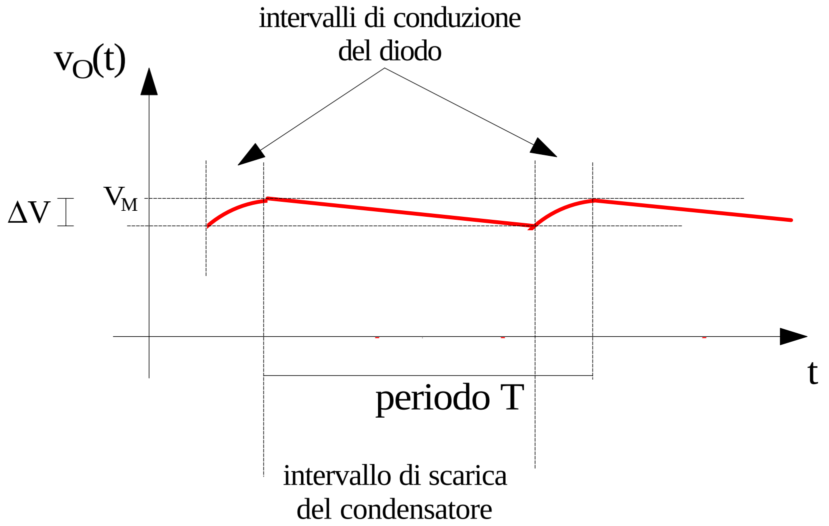
Man mano che la tensione di ingresso cresce, cresce anche la tensione ai capi del condensatore (e quindi del carico); si arriva allora al momento in cui la tensione di ingresso e la tensione di uscita raggiungono entrambe il valore di picco V_M; a questo punto, la tensione in ingresso prende nuovamente a scendere e ciò fa' si che la tensione ai capi del diodo non sia più V_γ, ma scenda al di sotto di tale valore; ciò comporta, evidentemente, che il diodo si spenga.

Se il diodo si spegne, non lascia passare corrente, per cui è come se il circuito si riducesse soltanto al parallelo tra il condensatore ed il resistore R_L. Essendo il condensatore carico, parte il processo di **scarica** del condensatore stesso (che costituisce una novità rispetto a quando il condensatore era assente) e sappiamo bene che tale scarica avviene con una costante di tempo pari a $\boldsymbol{\tau=CR_L}$: ciò significa che, dopo un intervallo di tempo pari a circa 4-5 costanti di tempo τ, il condensatore sarà completamente scarico.

Sennonché, mentre il condensatore si va scaricando, la tensione in ingresso $v_i(\omega t)$ continua a variare (e con essa varia anche la tensione ai capi del diodo, che segue perfettamente il suo andamento, anche se i valori sono ovviamente diversi, dato che c'è una tensione non nulla sul parallelo); essa scende, diventa negativa, raggiunge il picco inferiore (pari a $-V_M$) e poi riprende a salire; arriva allora il momento in cui il suo valore e quello della tensione del condensatore (che nel frattempo si sta scaricando), sono tali che la tensione ai capi del diodo superi nuovamente il valore V_γ: a questo punto, il diodo rientra in conduzione: se la scarica del condensatore non si è ancora completata (cosa che dipende dal valore della costante di tempo τ), essa si interrompe e riparte invece la carica. La tensione di uscita riprende ora a seguire perfettamente quella di ingresso.

Ovviamente, a questo punto si ripete il ciclo di prima, in quanto il diodo conduce quel tanto che è necessario per riportare la tensione sul condensatore al valore V_M; appena questo valore viene raggiunto, il diodo si spegne nuovamente e quindi riprende la scarica.

Possiamo in definitiva completare l'andamento della tensione di uscita nel modo seguente:



Influenza di C sulla tensione sul carico

E' evidente, dunque, che, grazie alla presenza del condensatore, riusciamo a mantenere la tensione ai capi del carico nell'intorno del valore V_M. La massima differenza raggiunta dalla tensione sul carico, rispetto al valore V_M, è stata indicata nella figura con ΔV e prende il nome di **ripple di tensione**.

Se vogliamo rendere la tensione ai capi del carico il più possibile costante, *dobbiamo minimizzare il valore di DV.* Ci poniamo quindi il problema di come effettuare questa minimizzazione.

Il discorso qualitativo fatto prima dà già una risposta a questa domanda: infatti, è evidente che *una riduzione di DV si ottiene riducendo il tempo che il condensatore ha a disposizione per scaricarsi.*

Allora, dato che non possiamo agire sulla forma d'onda della tensione, la cui frequenza è costante, dobbiamo necessariamente agire sulla costante di tempo $\tau=R_LC$ della scarica del condensatore: in particolare, dobbiamo aumentare il valore di questa costante di tempo, in modo tale che la scarica richieda più tempo. Per aumentare τ, non possiamo ovviamente aumentare R_L, che dipende dal carico, per cui l'unica possibilità è aumentare il valore di C.

Vediamo allora di fare qualche passaggio analitico per confermare questa conclusione.

In primo luogo, dovendo determinare C in modo da minimizzare ΔV, ci serve una espressione di ΔV in funzione appunto di C. Questa espressione è data dalla nota *legge di scarica del condensatore*:

$$V_O(t) = V_M e^{-\frac{t}{R_L C}}$$

Con riferimento all'ultimo grafico disegnato, indicando con T l'intervallo di tempo necessario perché la tensione di uscita parta da V_M e torni a V_M, possiamo scrivere che

$$V_O(t=T) = V_M - \Delta V = V_M e^{-\frac{T}{R_L C}} \longrightarrow \Delta V = V_M\left(1 - e^{-\frac{T}{R_L C}}\right)$$

Questa, in realtà, è una relazione approssimata, in quanto la scarica del condensatore non si interrompe dopo un intervallo di tempo di ampiezza T da quando è cominciata, ma dopo un intervallo di ampiezza leggermente inferiore, pari per l'esattezza a T-Δt. Tuttavia, ai fini dei nostri calcoli, si tratta di una approssimazione lecita.

Adesso, se facciamo l'ipotesi, anch'essa ragionevole, che $R_LC>>T$, possiamo sviluppare in serie di Taylor il termine esponenziale, fermandoci al 2° termine:

$$\Delta V = V_M\left(1 - 1 + \frac{T}{R_L C}\right) = \frac{V_M T}{R_L C}$$

Questa è dunque una semplice espressione di ΔV in funzione di C ed è chiaro che, al crescere di C, come previsto, il valore di ΔV diminuisce in modo perfettamente proporzionale.

Simulazioni al calcolatore

Possiamo anche sostituire qualche valore numerico al fine di valutare l’ordine di grandezza di C.

Intanto, per la tensione di alimentazione, scegliamo una frequenza di 50Hz: il valore della frequenza ci fornisce il valore del periodo, che è

$$T = \frac{1}{50}(\sec) = 20(m\sec)$$

Per quanto riguarda R_L, possiamo prendere un valore generico di circa 1 kΩ.

Per determinare il valore di C, dobbiamo invece stabilire quanto deve valere ΔV: per esempio, possiamo imporre la condizione per cui $\frac{\Delta V}{V_M} \le 0.001$, ossia che la variazione massima della tensione sul carico, rispetto al valore V_M dell’alimentazione, sia pari allo 0.1%, che è un valore abbastanza ragionevole.

La condizione che imponiamo è dunque

$$\frac{T}{R_L C} \le 0.001$$

Sostituendo i valori numerici, otteniamo $C \ge 0.02F$.

Effettuando *simulazioni al calcolatore*, si trova che, in corrispondenza dei valori appena specificati, prendendo C=0.03F, la tensione ai capi del carico si mantiene approssimativamente costante sul valore 11.6V, con un ripple pari a 37.087mV, cioè allo 0.3% di 11.6V.

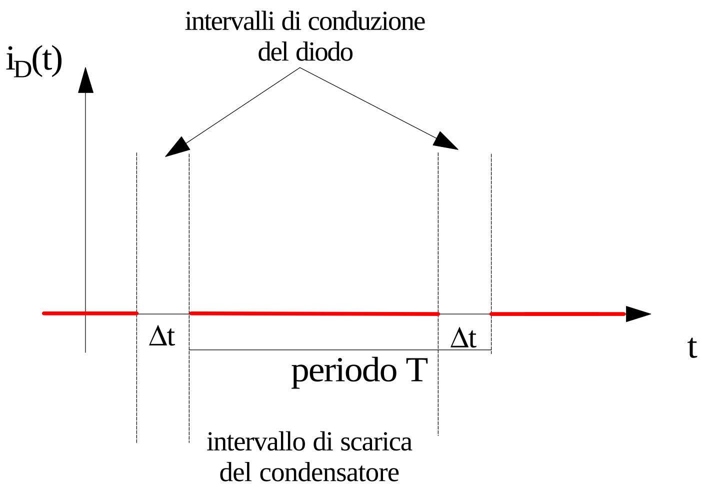
Sollecitazioni sul diodo

In base a quanto detto poco fa, sembrerebbe che l’aumento del valore di C abbia, come unico effetto sul circuito, quello di ridurre il valore di ΔV e quindi di migliorare le prestazioni del circuito come alimentatore: di conseguenza, sembrerebbe possibile aumentare C a proprio piacimento in modo da arrivare al valore di ΔV desiderato.

In realtà, *la presenza di C incide notevolmente sulle sollecitazioni di corrente e di tensione cui è sottoposto il diodo.* Vediamo in che modo avviene questo.

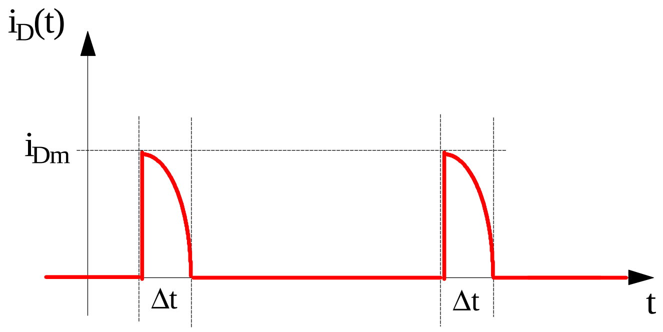
Il primo aspetto di cui ci occupiamo è il calcolo della *corrente massima* che fluisce nel diodo: questo calcolo è necessario in quanto, in fase di dimensionamento del circuito, dovremo sempre fare in modo che questa corrente massima non superi il valore limite tollerabile dal diodo stesso.

Per effettuare questo calcolo, è opportuno individuare l’andamento temporale della corrente che fluisce nel diodo. A tal proposito, abbiamo detto prima che il diodo è in conduzione solo in un intervallo di tempo Δt molto piccolo durante ogni periodo: si tratta dell’intervallo di tempo durante il quale la tensione ai capi del diodo si trova al di sopra di V_γ. Possiamo allora cominciare a rappresentare l’andamento della corrente nel diodo nel modo seguente:



Nei due intervalli indicati in figura, il diodo è in conduzione: *da un punto di vista fisico, la conduzione del diodo è determinata dal fatto che, durante questi intervalli, il diodo deve rifornire il circuito di quella carica che si è persa durante l'ultima scarica del condensatore.*

Come è fatta allora la corrente che fluisce nel diodo in tale intervalli? Si tratterà di impulsi di corrente fatti approssimativamente nel modo seguente:



Come detto, questi impulsi sono fatti in modo tale che l'area da essi sottesi corrisponda esattamente alla carica persa durante l'ultima scarica del condensatore. Possiamo allora applicare proprio il **principio di conservazione della carica** per ricavare il valore di i_{Dm}, ossia appunto la massima corrente che fluisce nel diodo.

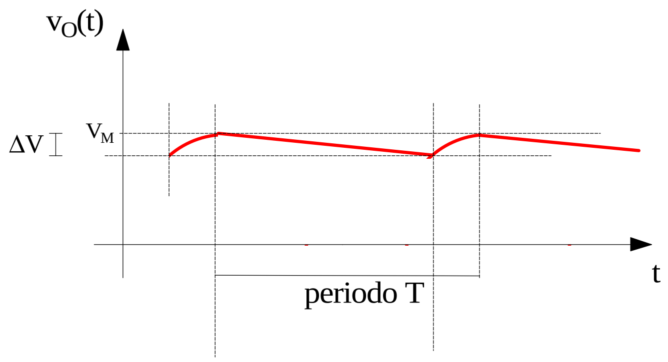
L'area sottesa da ciascun impulso può essere approssimata, essendo Δt abbastanza piccolo, con l'area di un rettangolo di base Δt e altezza i_{Dm}; la carica persa durante il processo di scarica del condensatore, che dura un tempo T (sempre ritenendo Δt piccolo), può essere invece approssimata con $I_L T$, dove I_L rappresenta la corrente nel carico.

Il bilancio di carica impone dunque che sia $i_{Dm}\Delta t = I_L T$ per cui

$$i_{Dm} = \frac{I_L T}{\Delta t} = \frac{I_L 2\pi}{\omega \Delta t}$$

Cerchiamo adesso di esprimere in modo opportuno $\omega \cdot \Delta t$.

Facciamo ancora una volta riferimento al grafico della tensione di uscita:



Se approssimiamo la curva della $v_O(t)$, in un generico intervallino Δt, con un tratto lineare anziché con uno curvilineo, possiamo scrivere che

$$\Delta V = V_M - V_M \cos(\omega \Delta t)$$

Facendo l’ipotesi (del tutto ragionevole) che sia $\omega \cdot \Delta t << 1$, possiamo sviluppare il coseno in serie di Taylor, arrestandoci ancora una volta al 2° termine:

$$\Delta V = V_M (1 - \cos(\omega \Delta t)) = V_M \left[1 - \left(1 - \frac{1}{2}(\omega \Delta t)^2\right)\right] = V_M \frac{1}{2}(\omega \Delta t)^2$$

Da qui ricaviamo che $\omega \Delta t = \sqrt{\frac{2\Delta V}{V_M}}$ e sostituendo, quindi, nell’espressione della i_{Dm}, otteniamo

$$\boxed{i_{Dm} = I_L 2\pi \sqrt{\frac{V_M}{2\Delta V}}}$$

Questa formula mette in evidenza come <u>la corrente massima che fluisce nel diodo è di gran lunga superiore alla corrente I_L che fluisce nel carico</u>. Dato che, quando non c’era il condensatore, la corrente nel carico era la stessa che fluiva nel diodo, deduciamo che ***l’inserimento del condensatore comporta un aumento della corrente massima nel diodo.***

Tale corrente è evidentemente tanto maggiore quanto minore è il rapporto $\Delta V/V_M$, ossia quindi quanto maggiore è il valore della capacità C. Di conseguenza, una volta fissato il valore che vogliamo ottenere per la quantità $\Delta V/V_M$, ossia una volta fissato il valore di C, <u>dobbiamo andare a scegliere il diodo in modo tale che la corrente massima prima calcolata non sia tale da bruciarlo</u>.

<u>Simulazioni al calcolatore</u>

Le *simulazioni al calcolatore*, effettuate prendendo C=0.03F, V_M=12V, R_L=1kΩ, f=50Hz, rivelano quanto segue:

- la corrente nel carico è all’incirca costante, così come la tensione, sul valore di 11.63mA;
- la corrente nel diodo è (ovviamente) nulla quando il diodo non conduce, mentre, quando esso va in conduzione, ha degli impulsi il cui valore arriva a circa 700mA.

La sollecitazione di corrente non è l'unica cui è soggetto il diodo. L'altra sollecitazione riguarda infatti la massima tensione inversa applicata ai suoi capi.

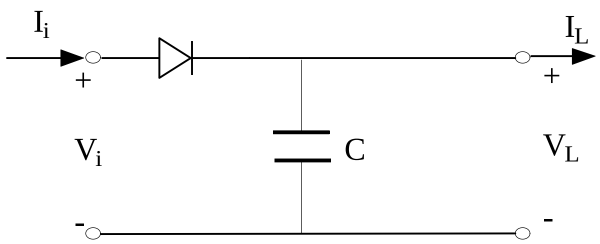
Quando abbiamo esaminato il circuito raddrizzatore in assenza del condensatore, abbiamo visto che tale massima tensione inversa è pari al valore V_M di picco della tensione di alimentazione. Inserendo, invece, il condensatore in parallelo al carico, è facile verificare che questa tensione vale $2V_M$. Quindi, *l'inserimento del condensatore provoca il raddoppio della massima tensione inversa ai capi del diodo.* Anche questo è un fattore di cui tenere conto nella scelta del diodo e nel dimensionamento del circuito.

Simulazioni al calcolatore

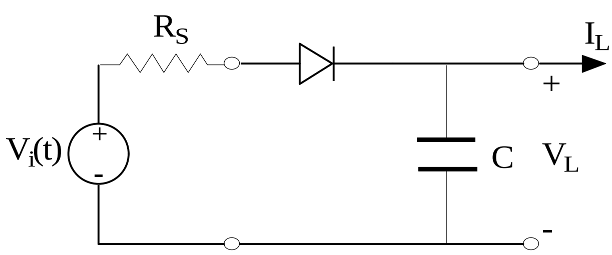
Le *simulazioni al calcolatore*, effettuate prendendo C=0.03F, V_M=12V, R_L=1kΩ, f=50Hz, rivelano che la tensione ai capi del diodo oscilla tra 0.295V e -23V.

Relazione tra tensione e corrente in uscita

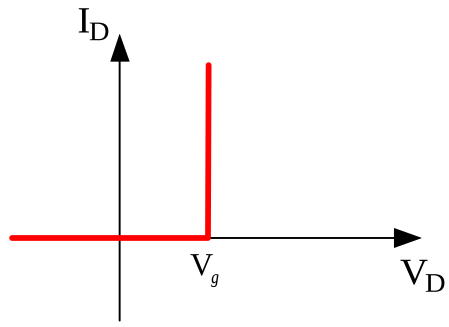
Consideriamo nuovamente il circuito raddrizzatore esaminato nei paragrafi precedenti, eliminando però il carico e lasciandolo del tutto generico:



Questa volta, anziché lasciare la tensione in ingresso $v_i(t)$ generica, supponiamo che essa sia applicata da una sorgente che presenta una certa resistenza serie R_S:



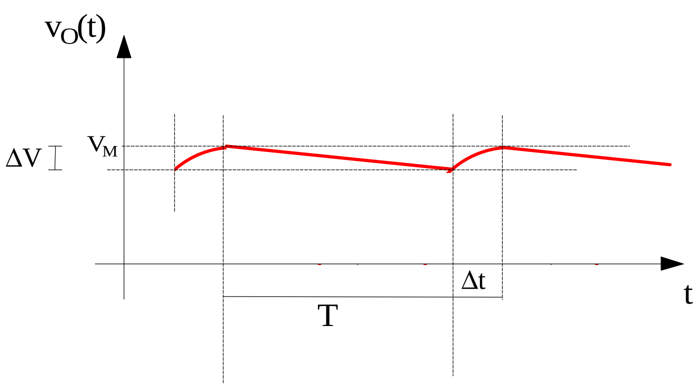
Supponiamo inoltre che la resistenza R_S includa anche l'eventuale resistenza del diodo quando è in fase di conduzione; in tal modo, il diodo presente nel circuito risulta avere adesso una caratteristica statica del tipo seguente:



cioè con resistenza infinita quando è spento e con resistenza nulla quando è acceso.

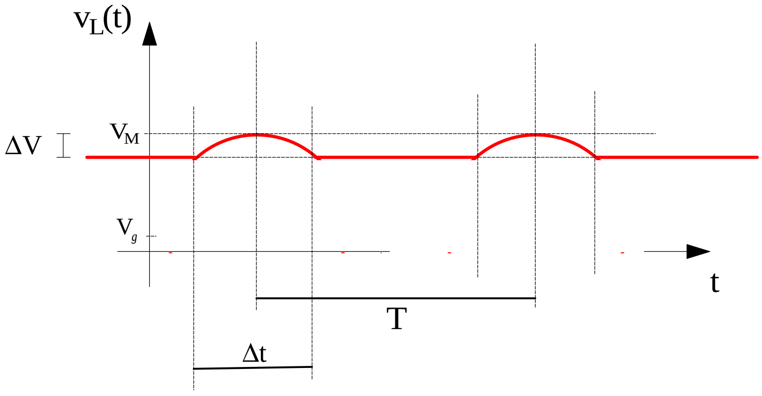
Siamo interessati alla relazione tra la corrente I_L e la tensione V_L alla porta del circuito: in particolare, vogliamo far vedere che si tratta di una *relazione non lineare*.

Per arrivare a questo risultato, è lecito fare la seguente approssimazione: abbiamo prima visto che la forma d'onda della tensione di uscita V_L (cioè la tensione con la quale noi andiamo ad alimentare l'eventuale carico) è del tipo



Essa è caratterizzata, tra le altre cose, dal fatto che la tensione $v_L(t)$ segue la tensione in ingresso fino a quando essa raggiunge il picco V_M e poi, durante l'intervallo di scarica del condensatore (che corrisponde al periodo di tempo in cui il diodo non conduce), scende dal valore V_M al valore V_M-ΔV.

Allora, l'approssimazione che facciamo è che la forma d'onda della tensione non abbia esattamente questo andamento, ma qualcosa del tipo riportato nella figura seguente:

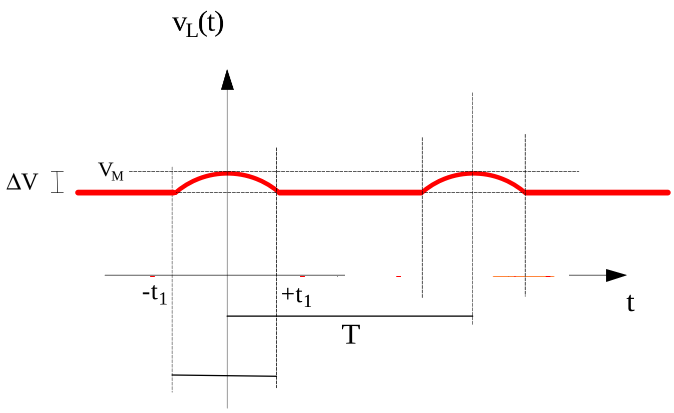


Stiamo dunque facendo due ipotesi:

- in primo luogo, stiamo supponendo che la tensione si mantenga costante sul valore V_M durante la scarica del condensatore;

- in secondo luogo, stiamo supponendo che la scarica stessa non cominci quando la tensione in ingresso giunge al picco V_M, ma qualche istante dopo e, in particolare, nel momento in cui la tensione in ingresso scende a quello stesso valore che determina, in ciascun ciclo, l'accensione del diodo.

Oltre a questo, sempre per comodità di ragionamento, cambiamo il nostro sistema di riferimento dei tempi, ponendolo come illustrato nella figura seguente:



Fatto tutto questo, passiamo a trovare la relazione analitica che lega la tensione V_L alla corrente I_L.

Il fatto che non ci sia dipendenza lineare tra queste due grandezze può intanto essere spiegato per via intuitiva: supponiamo infatti che, a partire da un certo istante, ci sia per esempio una riduzione di R_L, il che comporta che il carico assorba un valore di corrente I_L maggiore di quello che assorbiva prima; se la corrente I_L aumenta, la tensione continua V_L scende al di sotto del valore V_M , il che comporta un aumento dell'angolo di conduzione del diodo, ossia un aumento dell'intervallo di tempo durante il quale il diodo conduce. In particolare, l'angolo di conduzione deve aumentare tanto quanto è necessario per rimpiazzare la carica nel condensatore C persa durante il tempo in cui il diodo è spento (tempo approssimativamente pari a T).

Vediamo di arrivare a questo stesso risultato per via analitica.

Supponiamo intanto che la tensione in ingresso sia $v_S(t) = V_M \cos(\omega t)$. Quando il diodo conduce, cioè durante un generico intervallo $\Delta t = 2 \cdot t_1$, ricordando che stiamo ritenendo il diodo ideale (nel senso che assumiamo nulla la caduta di tensione ai suoi capi quando è in conduzione), la corrente che fluisce attraverso di esso vale

$$i_D(t) = \frac{v_S(t) - v_L(t)}{R_S} = \frac{V_M \cos(\omega t) - V_L}{R_S}$$

Questa relazione vale solo per $t \in [-t_1, t_1]$: il valore dell'istante t_1 si può ricavare facilmente in base alle ipotesi semplificative fatte, in quanto è evidente che

$$V_L = V_M \cos(\omega t_1) \longrightarrow t_1 = \frac{1}{\omega}\arccos\left(\frac{V_L}{V_M}\right)$$

La conoscenza dell’istante t_1 ci permette di applicare il *bilancio di carica*: infatti, in base al principio di conservazione della carica elettrica, la corrente che fluisce nel diodo nell’intervallo di conduzione $[-t_1, t_1]$ deve essere tale da bilanciare perfettamente la carica persa durante la scarica del condensatore. In termini analitici, abbiamo perciò che

$$\int_{-t_1}^{+t_1} i_D(t)dt = I_L T = I_L \frac{2\pi}{\omega}$$

Se, adesso, sostituiamo nell’integrale l’espressione della corrente trovata prima, otteniamo

$$\int_{-t_1}^{+t_1} \frac{V_M \cos(\omega t) - V_L}{R_S} dt = I_L \frac{2\pi}{\omega}$$

Risolvendo l’integrale (si tenga presente che il Coseno è una funzione pari), questa equazione diventa

$$\frac{2V_M}{R_S\omega}\sin(\omega t_1) - \frac{2V_L t_1}{R_S} = I_L \frac{2\pi}{\omega}$$

Qualche problema viene a questo punto dalla presenza del termine $\sin(\omega t_1)$: tuttavia, nell’ipotesi assolutamente ragionevole che sia $\omega t_1 << 1$, possiamo confondere quel seno con il suo argomento, per cui quella relazione diventa

$$\frac{2V_M t_1}{R_S} - \frac{2V_L t_1}{R_S} = I_L \frac{2\pi}{\omega}$$

e la possiamo anche riscrivere nella forma

$$\frac{2V_M}{R_S\omega}\left(1 - \frac{V_L}{V_M}\right)\cdot \omega t_1 = I_L \frac{2\pi}{\omega}$$

Cerchiamo ora di esplicitare meglio t_1: prima abbiamo trovato una espressione per questa grandezza, ma non è una espressione molto comoda ai fini di quello che vogliamo dimostrare. Possiamo allora procedere nel modo seguente: essendo $V_L = V_M \cos(\omega t_1)$, nell’ipotesi che $\omega t_1 << 1$, possiamo sviluppare il coseno in serie di Taylor, arrestandoci al secondo termine; così facendo, otteniamo che

$$V_L = V_M\left(1 - \frac{1}{2}(\omega t_1)^2\right)$$

e da qui ricaviamo che

$$\omega t_1 = \sqrt{2\left(1-\frac{V_L}{V_M}\right)}$$

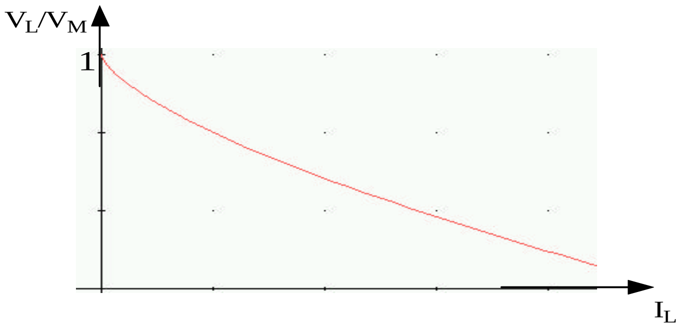
Sostituendo allora questa espressione del termine ωt_1 nella relazione di prima, otteniamo

$$\frac{2V_M}{R_S\omega}\left(1-\frac{V_L}{V_M}\right)\sqrt{2\left(1-\frac{V_L}{V_M}\right)} = I_L\frac{2\pi}{\omega}$$

Riarrangiando un po' questa relazione, possiamo concludere che la relazione tra V_L e I_L è la seguente:

$$\boxed{\frac{V_L}{V_M} = 1-\left(\frac{\pi R_S I_L}{\sqrt{2}V_M}\right)^{\frac{2}{3}}}$$

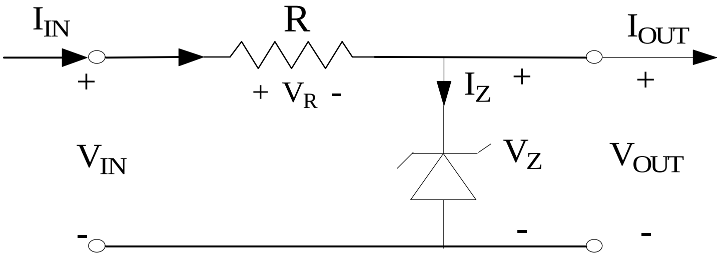
Come previsto, questa relazione evidenzia una dipendenza non lineare della V_L dalla I_L; se la riportiamo su un piano cartesiano, otteniamo quanto segue:



Circuito stabilizzatore

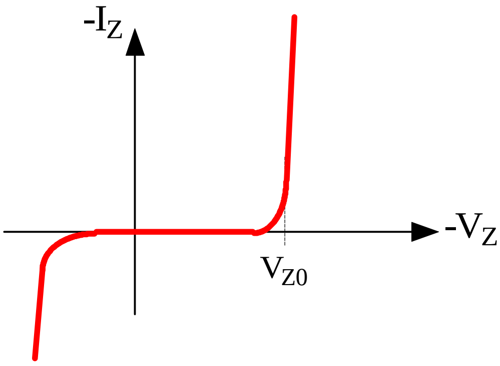
Abbiamo prima visto che l'inserimento della capacità C nel circuito raddrizzatore ha il pregio di mantenere la tensione di uscita approssimativamente costante nell'intervallo $\left[V_M - \Delta V, V_M\right]$, ma ha anche il difetto di aumentare le sollecitazioni sul diodo, in quanto aumenta sia la corrente massima che fluisce in esso sia la tensione inversa massima che risulta applicata ai suoi capi. Abbiamo inoltre trovato che, aumentando C, si riduce il valore di ΔV e si ottiene perciò una tensione di uscita più prossima al valore costante V_M. *Il fatto che, però, non si possa aumentare eccessivamente il valore di C, proprio per non sollecitare eccessivamente il diodo, suggerisce di procedere in un altro modo:* si lascia un valore di C tale che le sollecitazioni sul diodo non siano particolarmente elevate e tale che, allo stesso tempo, il valore di ΔV sia accettabile; in secondo luogo, si pone, in cascata al circuito raddrizzatore, un nuovo circuito, che prende il nome di **stabilizzatore**, il quale si occupa di ridurre ancora di più il valore di ΔV, ossia di stabilizzare ancora meglio la tensione di uscita.

Un circuito stabilizzatore è fatto nel modo seguente:



A ben guardare, si tratta di un circuito abbastanza simile ad un limitatore di tensione; la differenza sta nel fatto che il diodo utilizzato è un **diodo Zener** ed è posto con le polarità invertite rispetto a quanto si fa nei limitatori. Questo, come vedremo adesso, consente di sfruttare le prestazioni del diodo Zener quando lavora in breakdown.

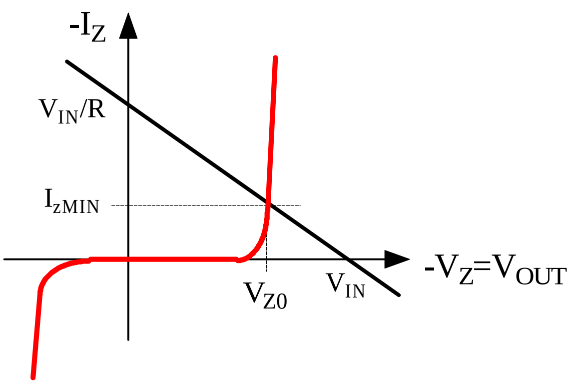
La caratteristica tensione-corrente di un diodo Zener, invertendo le polarità, è fatta approssimativamente nel modo seguente:



La tensione V_{z0} è la tensione di breakdown (negativa) del diodo: si osserva, rispetto ad un diodo tradizionale in diretta, sia la presenza di un *ginocchio di corrente* più marcato in corrispondenza della tensione di rottura sia una resistenza di conduzione più bassa.

Proprio questa resistenza di conduzione bassissima ci dice che, *se polarizziamo il diodo sufficientemente al di sopra del ginocchio di corrente, a prescindere da eventuali variazioni di corrente (sia pure entro certi limiti), la tensione ai capi del diodo, ossia la tensione ai capi del carico, rimane costante sul valore V_{z0}.*

Andiamo allora a trovare il punto di lavoro del circuito stabilizzatore: con il solito metodo grafico, ci basta intersecare la caratteristica del diodo con quella della restante parte del circuito; otteniamo dunque quanto segue:



Naturalmente, la retta che abbiamo tracciato corrisponde ad un prefissato valore della tensione in ingresso v_{IN}. Dato che questa tensione varia nel tempo, anche quella retta si muoverà nel tempo: in particolare, dato che la sua pendenza è costante in quanto dipende solo da R, quella retta non fa altro che spostarsi a sinistra o a destra ogni volta che la v_{IN} rispettivamente diminuisce o aumenta. Ciò comporta, evidentemente, delle fluttuazioni del punto di lavoro lungo la caratteristica del diodo: quando la v_{IN} aumenta, il punto di lavoro "sale", ossia aumenta la corrente; quando la v_{IN} diminuisce, il punto di lavoro "scende", ossia diminuisce la corrente.

Allora, considerando che siamo interessati a mantenere costante la V_{OUT}, dobbiamo preoccuparci che le variazioni della v_{IN} non siano tali da portare il punto di lavoro in corrispondenza o addirittura al di sotto del ginocchio di corrente. Se otteniamo questo risultato, avremo una tensione sul carico praticamente costante sul valore V_{z0}.

Come facciamo allora a ottenere questo risultato? Sono evidenti due osservazioni:

- la prima è che la tensione $v_L(t)$, essendo la tensione di uscita del raddrizzatore, ha una forma d'onda come quella ampiamente descritta in precedenza: si tratta di una specie di "dente di sega" i cui valori minimo e massimo sono rispettivamente V_M-ΔV e V_M; dato che ΔV, grazie al comportamento del raddrizzatore, è tutto sommato piccolo, le variazioni della v_L rispetto al valore V_M sono tutto sommate piccole;

- in secondo luogo, il parametro che dobbiamo dimensionare per evitare di scendere sul ginocchio di corrente è chiaramente la resistenza R, che regola la pendenza di quella retta: quanto più riduciamo il valore di R, tanto più la pendenza 1/R aumenta (in quanto aumenta il valore dell'intersezione della retta con l'asse delle correnti) e quindi tanto più sale il punto di lavoro sulla caratteristica del diodo.

In definitiva, quindi, il dimensionamento di R deve essere tale da soddisfare due condizioni fondamentali:

- il punto di lavoro deve trovarsi sempre al di sopra del valore di corrente che, nell'ultimo grafico riportato, abbiamo indicato con I_{ZMIN}: si tratta chiaramente del valore di corrente al di sotto del quale entriamo nel ginocchio della curva;
- in secondo luogo, il punto di lavoro deve trovarsi sempre al di sotto del valore massimo di corrente tollerabile dal diodo (valore massimo che indichiamo con I_{zMAX}).

Vediamo ad esempio quale relazione possiamo applicare, per il calcolo di R, in modo da rispettare la prima condizione.

Se applichiamo le leggi di Kirchoff e la relazione di lato del resistore, possiamo scrivere che

$$v_{IN}(t) = Ri_R(t) + v_Z(t)$$

La corrente che scorre nel resistore è pari alla somma della corrente che fluisce nel diodo e della corrente assorbita dal carico, per cui quella relazione equivale anche a

$$v_{IN}(t) = R\left(i_Z(t) + i_{OUT}(t)\right) + v_Z(t)$$

Per quanto riguarda il diodo, se operiamo una linearizzazione della sua caratteristica, possiamo ritenere che, in conduzione, esso si comporti come la serie tra una batteria di tensione V_{Z0} e un resistore di resistenza r_Z (molto bassa), per cui

$$v_{IN}(t) = R\left(i_Z(t) + i_{OUT}(t)\right) + V_{z0} - r_Z i_Z(t)$$

Esplicitando da questa relazione la resistenza R, abbiamo

$$R = \frac{v_{IN}(t) - \left(V_{Z0} - r_Z i_Z(t)\right)}{i_Z(t) + i_{OUT}(t)}$$

La condizione da imporre è che, in corrispondenza del minimo valore di $v_{IN}(t)$ e in corrispondenza del massimo valore della corrente i_{OUT} assorbita dal carico, la tensione ai capi del diodo (che è la tensione ai capi del carico stesso) si mantenga sul valore V_{Z0} (e quindi la corrente non scenda al di sotto del valore $I_{z,MIN}$):

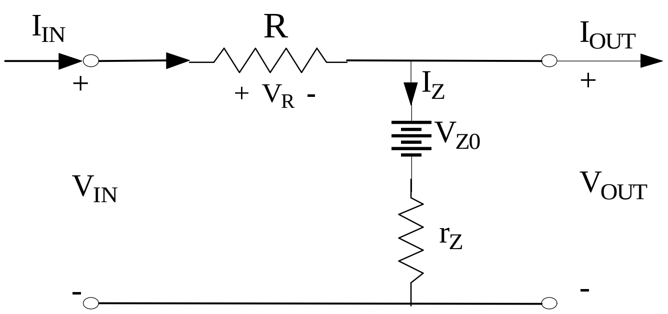
$$\boxed{R = \frac{v_{IN,MIN} - \left(V_{Z0} - r_Z I_{z,MIN}(t)\right)}{I_{z,MIN} + I_{OUT,MAX}}}$$

Usando questa relazione per il dimensionamento, otteniamo una tensione di uscita sul carico sufficientemente stabilizzata e pari approssimativamente a V_{Z0}.

Indici di prestazione del circuito stabilizzatore

Il circuito stabilizzatore appena analizzato è caratterizzato fondamentalmente da due “indici di prestazione”, ossia due parametri che consentono di valutare l’efficacia della sua azione. Questi due parametri si ricavano molto facilmente nel modo seguente.

Abbiamo detto prima che il circuito stabilizzatore svolge la sua azione quando il diodo Zener è polarizzato con un punto di lavoro al di sopra del ginocchio di corrente; in questa condizione di funzionamento, il diodo si comporta come una serie tra una batteria di tensione V_{Z0} e un resistore di resistenza r_Z:



Calcoliamo allora la tensione di uscita applicando la sovrapposizione degli effetti: gli ingressi, in questo circuito, sono V_{IN}, V_{Z0} e I_{OUT}, per cui otteniamo che

$$V_{OUT} = \frac{r_Z}{r_Z + R} V_{IN} + \frac{R}{r_Z + R} V_{Z0} - \frac{r_Z R}{r_Z + R} I_{OUT}$$

Questa relazione è molto importante in quanto ci mostra come il circuito svolge il suo ruolo di stabilizzatore della tensione V_{OUT}: infatti, i termini $\frac{r_Z}{r_Z+R}$ e $\frac{r_Z R}{r_Z+R}$, dato il basso valore di r_Z, sono estremamente bassi e testimoniano come la tensione V_{OUT} dipenda in modo assolutamente lieve dalla tensione in ingresso V_{IN} e dalla corrente assorbita dal carico I_{OUT}; al contrario, il termine $\frac{R}{r_Z+R}$, che è molto prossimo ad 1, indica che la tensione V_{OUT} sul carico si mantiene approssimativamente costante e pari a V_{Z0}.

Sulla base di ciò, si introducono i seguenti due indici di prestazione:

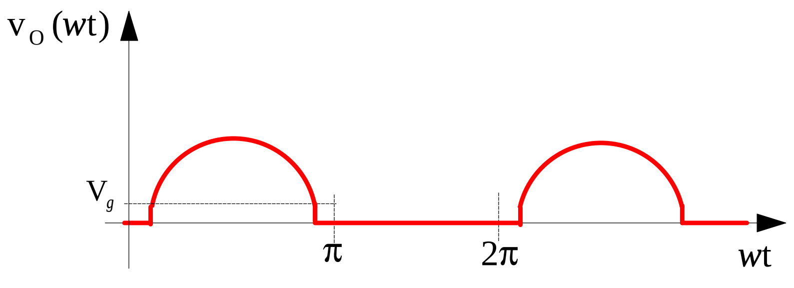
- il termine $\frac{r_Z}{r_Z+R}$ prende il nome di **regolazione di linea** in quanto, come detto, quantifica l'influenza dell'alimentazione sulla tensione ai capi del carico;
- il termine $\frac{r_Z R}{r_Z+R}$ prende invece il nome di **regolazione di carico** in quanto quantifica l'influenza del carico.

E' chiaro che, una volta dimensionata R, questi due indici di prestazione dipendono dalle caratteristiche del diodo Zener.

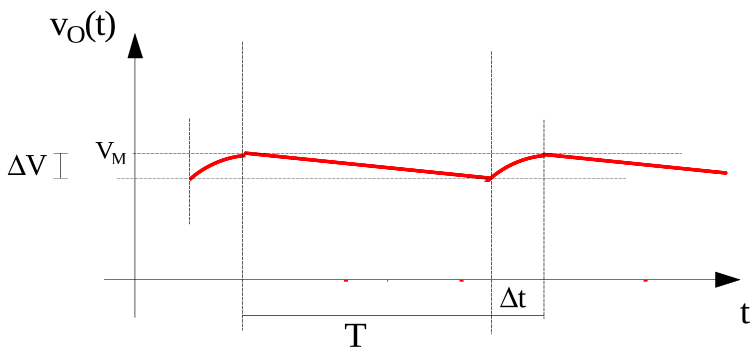
Raddrizzatore a doppia semionda

Una volta assodato come funziona un circuito stabilizzatore, torniamo a parlare di come deve essere fatto il circuito raddrizzatore da porre prima di esso.

In precedenza, abbiamo esaminato il funzionamento di un *circuito raddrizzatore a singola semionda*; abbiamo visto, in particolare, che, senza porre alcun condensatore in parallelo al carico, la tensione di uscita di tale raddrizzatore (in presenza di una tensione di ingresso sinusoidale) è del tipo seguente:

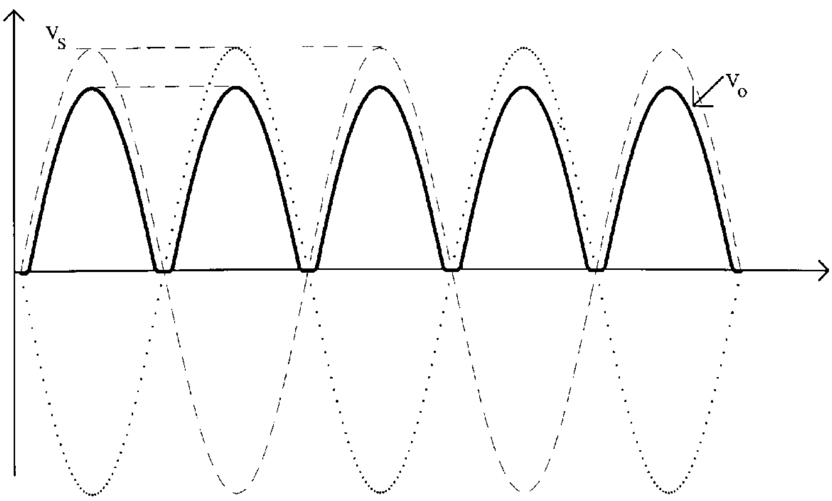


Ponendo, invece, un condensatore (di capacità opportuna) in parallelo al carico, la tensione di uscita assume a regime la forma d'onda seguente:



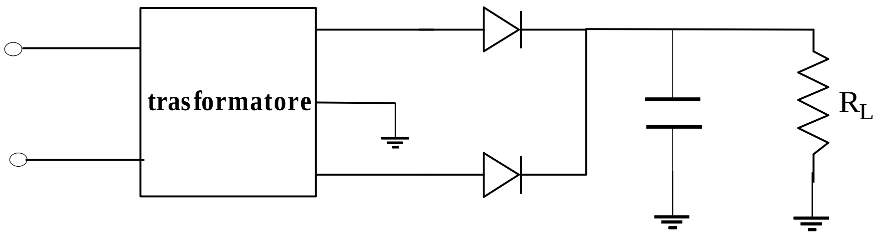
Abbiamo detto che il principale inconveniente di un circuito fatto in questo modo è che il diodo è sottoposto a sollecitazioni elevate: allora, anche se abbiamo visto come ridurre queste sollecitazioni demandando ad un circuito stabilizzatore parte dei compiti svolti dal condensatore, è evidente che, se riuscissimo a trovare un modo per ridurre tali sollecitazioni, ne ricaveremmo senz'altro un vantaggio.

Un modo abbastanza semplice di ridurre queste sollecitazioni è il seguente: abbiamo detto che la sollecitazione di corrente sul diodo deriva dal fatto che questo elemento, quando è in conduzione, deve rimpiazzare la carica persa precedente durante l'ultimo processo di scarica del condensatore; quanta più carica perde il condensatore, tanto maggiore deve essere la corrente applicata dal diodo e quindi tanto maggiore è la sollecitazione cui il diodo è sottoposto. Di conseguenza, possiamo ridurre questa sollecitazione se troviamo il modo di ridurre la carica persa dal condensatore. Per ridurre tale carica, basta ridurre l'intervallo di tempo che il condensatore ha a disposizione per scaricarsi. E' possibile fare questo realizzando un circuito che si comporti nel modo seguente: intanto, esso lascia invariata la parte positiva forma d'onda della tensione di ingresso, così come fa il raddrizzatore a singola semionda; in secondo luogo, anziché abbattere la parte negativa della forma d'onda in ingresso, esso la ribalta completamente, in modo da ottenere una forma d'onda della tensione di uscita V_O sul carico fatta nel modo seguente:



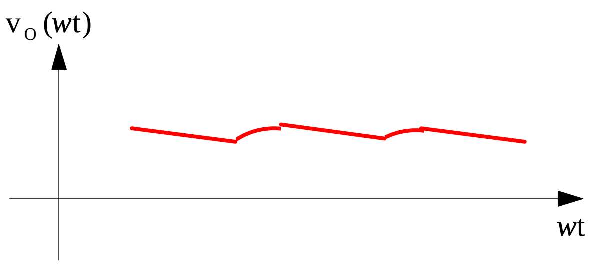
Ponendo allora il solito condensatore in parallelo al carico, è chiaro che riduciamo (per la precisione dimezziamo) l'intervallo di tempo a disposizione per la scarica del condensatore: questo comporta la perdita di una minore quantità di carica da parte del condensatore e quindi la possibilità di applicare impulsi di corrente minori da parte del diodo o dei diodi.

Un circuito che effettua queste operazioni è fatto nel modo seguente:

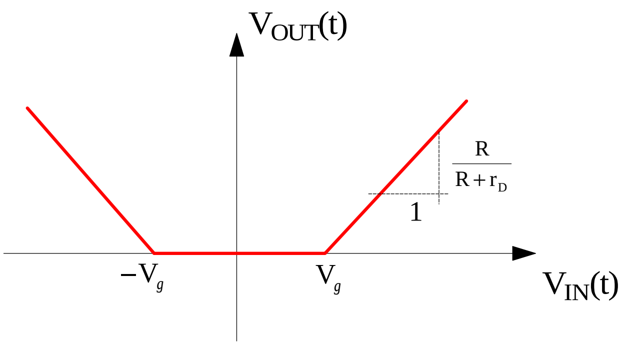


In pratica, il trasformatore ([2]) ha il compito di ridurre il valore di picco della tensione alternata fornita dall'alimentazione esterna; all'uscita dal trasformatore, arriva dunque una tensione sinusoidale che i due diodi provvedono a trattare opportunamente: in particolare, *il diodo superiore sopprime la parte negativa della forma d'onda, mentre il diodo inferiore sopprime quella positiva;* successivamente, le due forme d'onda così ottenute vengono sommate algebricamente in modo tale da ottenere una forma d'onda come quella illustrata prima.

Il condensatore provvede poi a portare la tensione di uscita ad oscillare (anche se non più in modo sinusoidale) nell'intervallo $\left[V_M - \Delta V, V_M\right]$:



La caratteristica di trasferimento di questo **raddrizzatore a doppia semionda**, in assenza del condensatore in parallelo al carico, è la seguente:



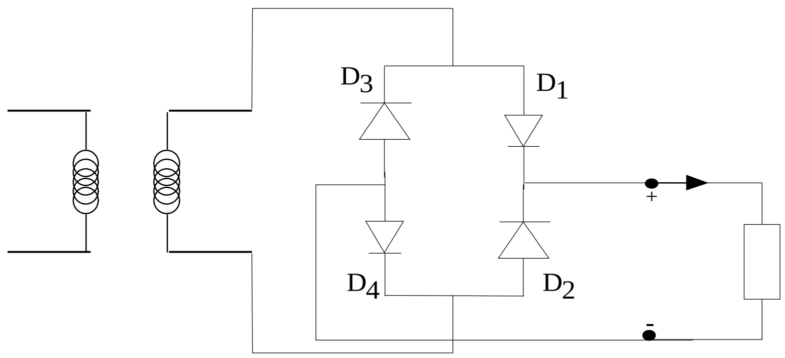
[2] Si tratta, in particolare, di un *trasformatore a presa centrale*.

Ponte di Graetz

Il circuito raddrizzatore a doppia semionda appena esaminato presenta fondamentalmente due inconvenienti:

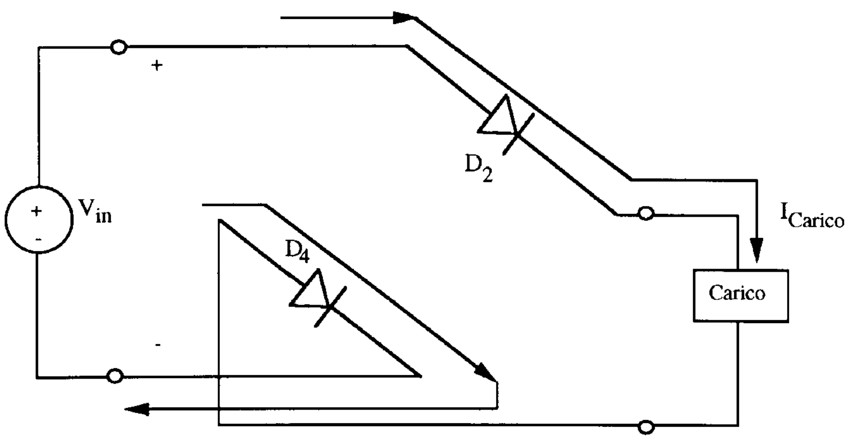
- in primo luogo, prevede l’uso di un *trasformatore a presa centrale*, che è un dispositivo molto costoso;
- in secondo luogo, la massima tensione inversa applicata ai capi dei due diodi vale $2V_M$ e si tratta di un valore particolarmente alto, il che richiede l’uso di diodi opportuni.

E’ allora possibile ovviare a questi due inconvenienti, facendo uso di un altro circuito, fatto nel modo seguente:

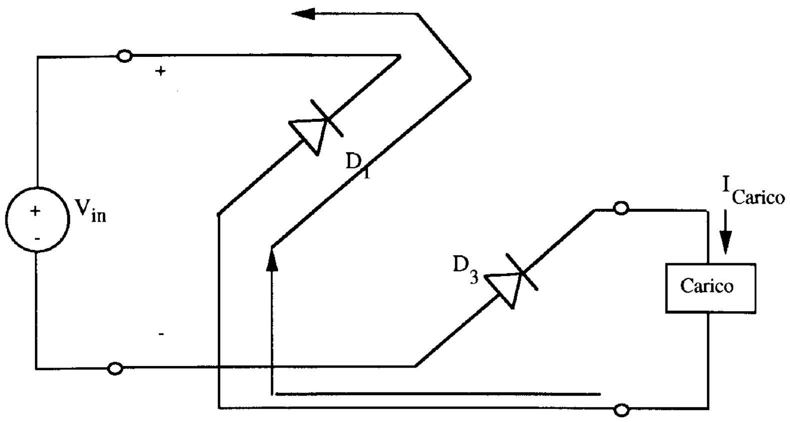


La funzione che prima era svolta da due diodi, adesso è svolta da un **ponte di 4 diodi**:

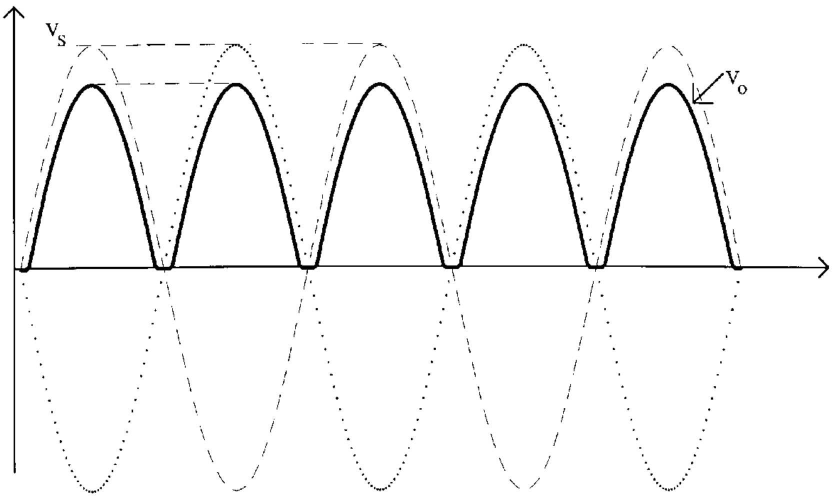
- quando la tensione in uscita dal secondario del trasformatore è positiva, i diodi D_2 e D_4 risultano polarizzati direttamente, mentre i diodi D_1 e D_3 sono polarizzati inversamente;



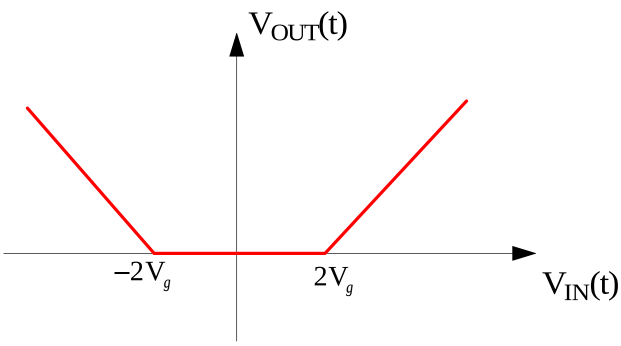
- quando la tensione in uscita dal secondario del trasformatore è negativa, invece, i diodi D_1 e D_3 sono polarizzati inversamente e i diodi D_2 e D_4 polarizzati direttamente.



Questo meccanismo fa' si che la tensione di uscita dal ponte sia fatta ancora una volta nel modo seguente:



Il vantaggio, come detto, sta sia nella possibilità di utilizzare un *trasformatore tradizionale* sia, anche, nel fatto che la tensione inversa massima ai capi di ciascun diodo non supera adesso il valore V_M.
La caratteristica di trasferimento di questo circuito è fatta nel modo seguente:



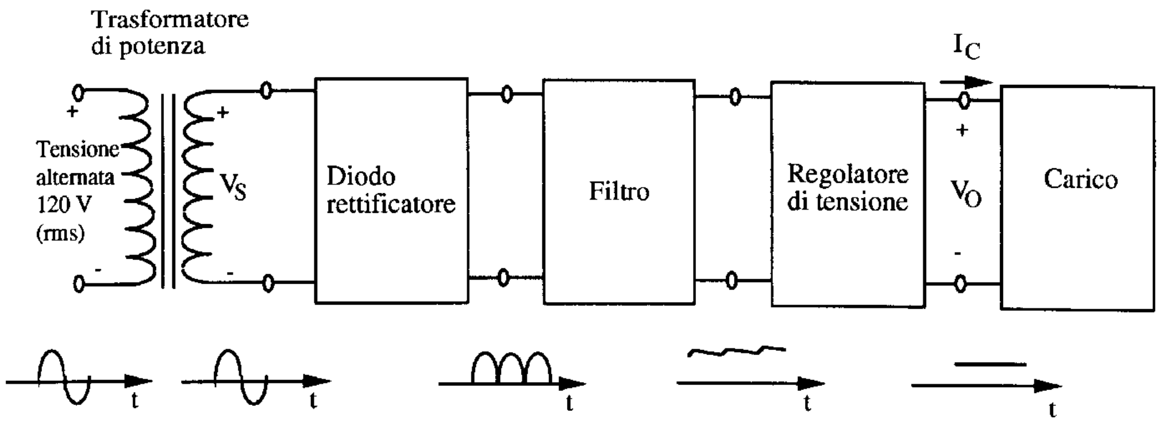
Possiamo comunque fare delle importanti osservazioni:

- la tensione v_{OUT} in uscita dal ponte ha la stessa ampiezza di quella in ingresso solo nella ipotesi di ritenere i diodi ideali, nel quale caso, con riferimento alla caratteristica di trasferimento appena disegnata, la pendenza di quelle due rette è di 45°; in realtà, invece, le cadute di tensione sui diodi comportano che l’ampiezza della v_{OUT} sia inferiore a quella della tensione di ingresso: *simulazioni al calcolatore* mostrano, ad esempio, che, se la tensione di alimentazione ha una ampiezza V_M=12V e se i 4 diodi hanno una tensione di accensione V_γ=0.75V, l’ampiezza della tensione di uscita è di circa 9V, ossia 3V in meno rispetto all’ingresso;

- sempre a causa delle cadute di tensione sui diodi, la massima tensione inversa che risulta applicata ai capi di ciascun diodo non è pari proprio a V_M, ma qualcosa in meno: le simulazioni al calcolatore mostrano, ad esempio, che, quando V_M=12V, la massima tensione inversa applicata ai capi dei diodi è di circa 10.3V.

Struttura completa di un alimentatore

Siamo adesso in grado di fornire uno schema assolutamente generale di come deve essere fatto un efficiente **circuito alimentatore**, ossia, come detto, un circuito che riceva in ingresso una tensione alternata e la converta in una tensione continua del valore desiderato:



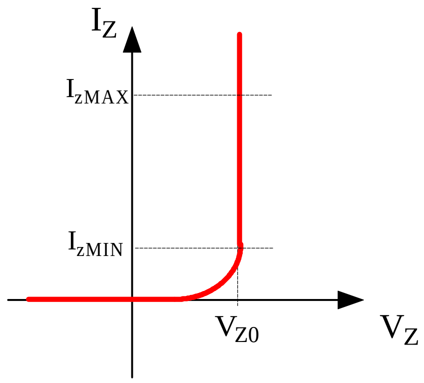
Esempio numerico

Per chiarire meglio i concetti esposti fino ad ora sui circuiti alimentatori e per evidenziare anche quali sono i problemi legati al dimensionamento di tali circuiti, vediamo un esempio numerico.

Supponiamo di dover dimensionare il circuito in modo che la tensione ai capi del carico sia V_{OUT}=8V e in modo che la corrente assorbita dal carico, in corrispondenza di questa tensione, sia I_{OUT}=40mA. L’unica informazione a nostra disposizione, oltre queste specifiche riguardo il carico, è la forma d’onda $e(t) = E\sin(\omega t)$ della tensione di alimentazione, ossia della tensione che alimenta il ramo primario del trasformatore.

Dato che abbiamo a disposizione le specifiche sul carico, il dimensionamento va necessariamente fatto procedendo da destra verso sinistra, ossia appunto partendo dalla sezione di carico. In tal modo, il primo dispositivo che dobbiamo dimensionare è il diodo Zener.

Ricordiamo che il diodo Zener ha una caratteristica fatta nel modo seguente (nell'ipotesi di considerare nulla la resistenza di conduzione del diodo):



Le specifiche da imporre sono due:

- in primo luogo, la tensione ai capi del diodo è la tensione che vogliamo mantenere costante ai capi del carico: chiaramente, allora, andremo a sistemare nel circuito un diodo Zener per il quale sia $V_{z0}=V_{OUT}=8V$; perché la tensione ai capi del diodo si possa mantenere costante su questo valore nonostante il diodo venga alimentato da una tensione variabile, è necessario che il punto di lavoro Q del diodo sia tale che la corrente I_Z non scenda mai al di sotto del valore I_{zMIN} che delimita il ginocchio di corrente: quindi, la prima specifica da imporre è che risulti

$$I_Z > I_{zMIN}$$

- d'altro canto, la corrente nel diodo non può superare il valore massimo I_{zMAX} tollerato dal dispositivo, per cui la seconda specifica sarà

$$I_Z < I_{zMAX}$$

Questo valore massimo I_{zMAX} è una costante che dipende dalla potenza massima P_{zMAX} che il diodo è in grado di dissipare: infatti, questa potenza è pari al prodotto della corrente che fluisce nel diodo per la tensione applicata ai suoi capi, per cui, volendo mantenere una tensione costante sul valore 8V, avremo bisogno di un diodo tale che

$$P_{zMAX} = I_{zMAX} V_{z0} = 8 I_{zMAX} (W)$$

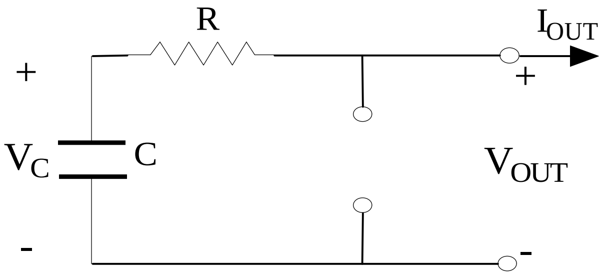
Per esempio, possiamo scegliere un diodo che sia in grado di dissipare una massima potenza di 500mW: in tal modo, la massima corrente che potremo far circolare nel diodo è

$$I_{zMAX} = \frac{P_{zMAX}}{I_{zMAX}} = \frac{500mW}{8V} = 62{,}5(mA)$$

Quindi, riepilogando, se supponiamo che le specifiche del diodo indichino $I_{zMIN}=5(mA)$, possiamo dire che il dimensionamento del circuito andrà fatto facendo in modo che la corrente nel diodo Zener soddisfi alla doppia condizione $5(mA) \le I_Z \le 62.5(mA)$.

Ci chiediamo, allora, quali parametri vanno determinati in modo da rispettare quella relazione. E' chiaro che si tratta di tutti quei parametri che regolano la posizione del punto di lavoro Q del diodo Zener.

Questo punto di lavoro corrisponde alla intersezione della caratteristica del diodo con la caratteristica della restante parte del circuito, che è riportata nella figura seguente:



dove, ovviamente, la tensione $v_C(t)$, che rappresenta una "specie" di ingresso, dipende a sua volta da tutto quello che c'è "dietro" il condensatore.

Troviamo allora l'equazione di questa caratteristica, ossia troviamo il legame tensione-corrente ai morsetti che vanno chiusi sul diodo Zener: si tratterà, evidentemente, di un equivalente di Thevenin in cui

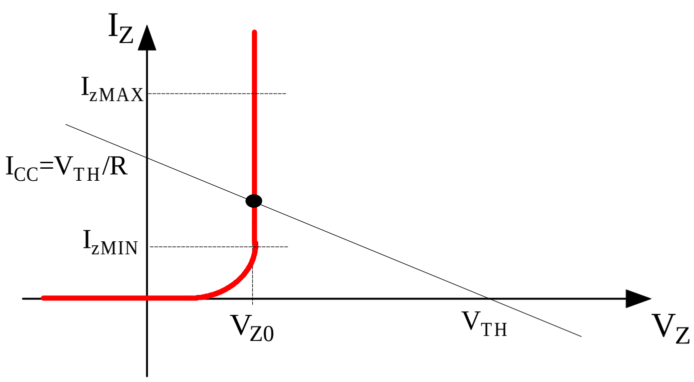
$$V_{TH} = V_C - RI_{OUT}$$

$$I_{cortocircuito} = \frac{V_{TH}}{R_{TH}} = \frac{V_C}{R} - I_{OUT}$$

per cui l'equazione ricercata è

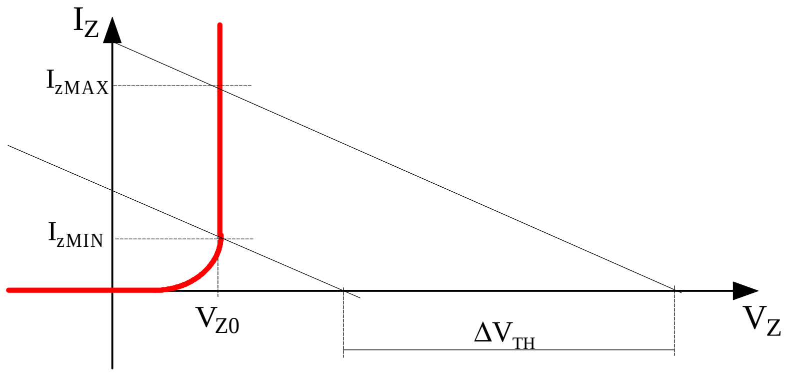
$$I = \left(\frac{V_C}{R} - I_{OUT} \right) + \frac{V}{R}$$

Intersecando graficamente le due caratteristiche, abbiamo quanto segue:



Adesso possiamo imporre le specifiche sul diodo Zener. Infatti, è chiaro che la retta di cui abbiamo poco fa individuato l'equazione varia al variare di V_{TH} (e cioè di V_C) e di R: allora, dobbiamo determinare i valori di V_C e di R in modo tale che la corrente nel diodo soddisfi la condizione $I_{zMIN} \le I_Z \le I_{zMAX}$.

Supponiamo, per il momento, che il valore di R (cioè della pendenza della retta) sia stato fissato, per cui dobbiamo stabilire quali sono i limiti di variazione della V_C. I due casi limite sono illustrati nella figura seguente:



Considerando che l'equazione della generica di quelle due rette è

$$I = \left(\frac{V_C}{R} - I_{OUT} \right) + \frac{V}{R}$$

possiamo allora affermare quanto segue:

- perché il punto di lavoro del diodo sia (V_{z0},I_{zMIN}), deve accadere che

$$I_{zMIN} = \left(\frac{V_{C,MIN}}{R} - I_{OUT} \right) + \frac{V_{Z0}}{R}$$

  ossia che $V_{C,MIN} = RI_{zMIN} + RI_{OUT} - V_{Z0}$

- perché il punto di lavoro del diodo sia invece (V_{z0},I_{zMAX}), deve accadere che

$$I_{zMAX} = \left(\frac{V_{C,MAX}}{R} - I_{OUT} \right) + \frac{V_{Z0}}{R}$$

  ossia che $V_{C,MAX} = RI_{zMAX} + RI_{OUT} - V_{Z0}$

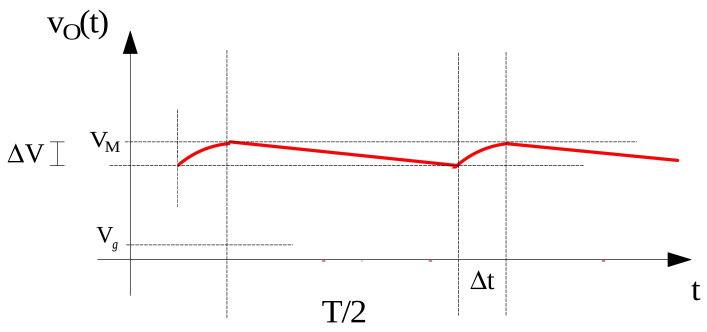
Quindi, l'intervallo di variazione della tensione ai capi del condensatore è

$$\left[RI_{zMIN} + RI_{OUT} - V_{Z0}, RI_{zMAX} + RI_{OUT} - V_{Z0} \right]$$

L'ampiezza di questo intervallo è $\Delta V_C = R(I_{zMAX} - I_{zMIN})$, per cui questa è la massima variazione che possiamo tollerare ai capi del condensatore se vogliamo che la tensione ai capi del carico sia costante sul valore V_{Z0}. Considerando che, in base a quello che abbiamo visto nei paragrafi precedenti, la tensione ai capi del condensatore varia (almeno nel caso ideale) nell'intervallo $\left[V_M - \Delta V, V_M \right]$(dove ricordiamo che anche V_M è una incognita), deduciamo che ΔV_C=ΔV.

Andiamo allora a trovare quanto vale ΔV tenendo presente che il condensatore si scarica sulla resistenza R collegata in serie con il diodo Zener, il quale funziona in pratica come un generatore di tensione di valore V_{z0}.

Facciamo riferimento al diagramma della tensione ai capi del condensatore:



La legge di scarica del condensatore è allora

$$V_C = V_{z0} + (V_M - V_{z0})e^{-\frac{t}{RC}}$$

dove V_{z0} è la tensione finale ai capi del condensatore e V_M quella iniziale.

Sviluppando l'esponenziale in serie di Taylor arrestato al secondo termine, questa equazione equivale anche a

$$V_C = V_{z0} + (V_M - V_{z0})\left(1 - \frac{t}{RC}\right)$$

Adesso, anche se la durata dell'intervallo di scarica è $\frac{T}{2} - \Delta t$ (dove Δt è l'intervallo di tempo in cui i diodi conducono per rimpiazzare la carica persa nella scarica precedente), possiamo trascurare il termine Δt rispetto a T/2, per cui possiamo scrivere che il valore cui arriva la tensione sul condensatore al termine della scarica è

$$V_{C\,min} = V_{z0} + (V_M - V_{z0})\left(1 - \frac{T}{2RC}\right)$$

e possiamo perciò scrivere che la variazione di tensione è

$$\Delta V = V_M - V_{C\,min} = (V_M - V_{z0}) - (V_M - V_{z0})\left(1 + \frac{T}{2RC}\right) = (V_M - V_{z0})\frac{T}{2RC}$$

Possiamo adesso osservare che il termine $V_{R,MAX} = (V_M - V_{z0})$ rappresenta la massima caduta di tensione ai capi della resistenza R: infatti, mentre la tensione ad un morsetto si mantiene costante sul valore V_{z0}, la tensione sull'altro morsetto è la tensione ai capi del condensatore, che varia tra 0 e V_M. Questa caduta massima di tensione si può anche calcolare, usando la legge di Ohm, come

$$V_{R,MAX} = R(I_{OUT} + I_{zMAX})$$

in quanto il termine $(I_{OUT} + I_{zMAX})$ corrisponde alla massima corrente che può fluire nel resistore.

Eguagliando allora le due espressioni, troviamo che

$$\left(V_M - V_{z0}\right) = R\left(I_{OUT} + I_{zMAX}\right)$$

e quindi, andando a sostituire nella espressione di ΔV, troviamo

$$\Delta V = \frac{R\left(I_{OUT} + I_{zMAX}\right)}{2RC}T = \frac{\left(I_{OUT} + I_{zMAX}\right)}{2C}T$$

Se adesso eguagliamo questa espressione di ΔV con quella ottenuta in precedenza, otteniamo che

$$\frac{\left(I_{OUT} + I_{zMAX}\right)}{2C}T = R\left(I_{zMAX} - I_{zMIN}\right)$$

Questa relazione ci servirà tra poco, quando, una volta trovato il valore di R, dovremo determinare il valore di C.

Vediamo allora sulla base di cosa dobbiamo determinare R. La cosa fondamentale da considerare è che R influisce sulla pendenza della retta che va intersecata con la caratteristica del diodo Zener per trovare il punto di lavoro di quest'ultimo:

- se aumentiamo R, la pendenza della retta aumenta e quindi, a parità di C, abbiamo un valore di ΔV_{TH} maggiore;
- viceversa, se riduciamo R, la pendenza della retta diminuisce e quindi, sempre a parità di C, abbiamo un valore di ΔV_{TH} minore.

A noi interessa, però, avere un valore esteso di ΔV_{TH} e, contemporaneamente, un valore di C piccolo: dobbiamo allora scegliere un valore di R in modo da trovare un compromesso tra queste due esigenze. Prendiamo allora il valore R=20Ω.

Sulla base del valore di R, possiamo andare a determinare C mediante la relazione trovata prima: risulta

$$C = \frac{\left(I_{OUT} + I_{zMAX}\right)}{2R\left(I_{zMAX} - I_{zMIN}\right)}T = 890\mu F$$

dove abbiamo preso T=1/f=1/50(Hz)=0.02(sec).

A questo punto, l'ultima cosa che rimane da fare è il dimensionamento dei 4 diodi, che supponiamo essere tutti uguali, e del trasformatore.

Autore: **Sandro Petrizzelli**
e-mail: sandry@iol.it
sito personale: http://users.iol.it/sandry