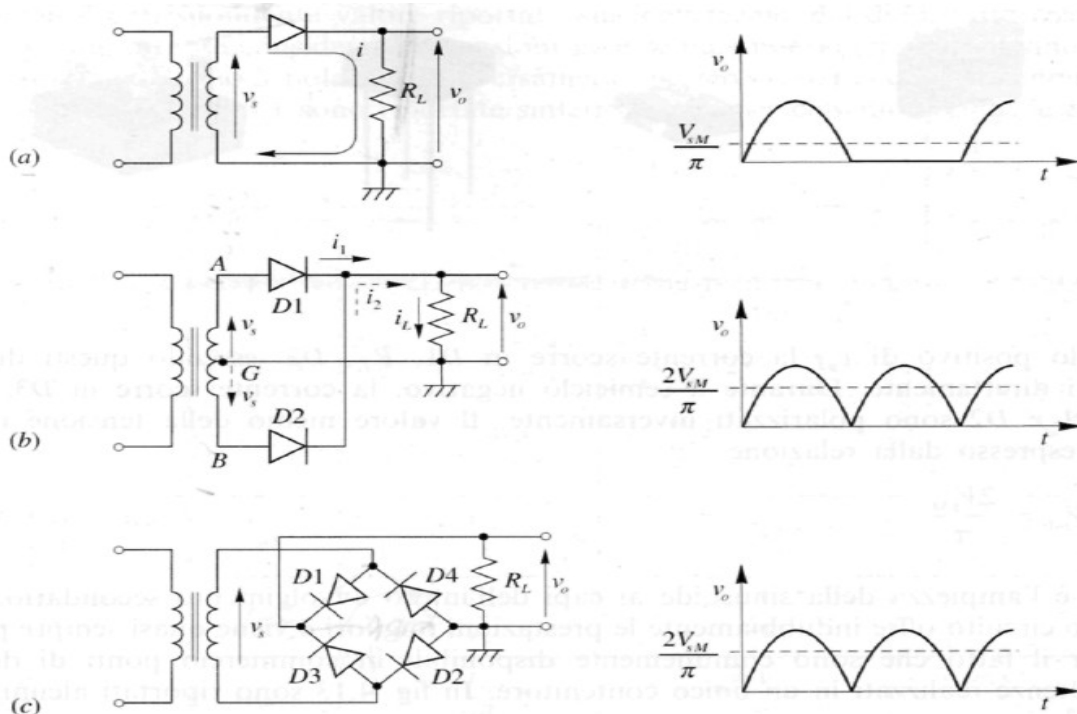


Circuiti raddrizzatori

I circuiti raddrizzatori convertono una tensione alternata con valore medio nullo in una tensione unipolare con valore medio diverso da zero.

Essi trovano la loro principale applicazione nella realizzazione degli alimentatori, di cui costituiscono un elemento fondamentale. In questo caso il segnale applicato all'ingresso è la tensione alternata sinusoidale con frequenza 50 Hz (in Europa) o 60 Hz (in America) presente sul secondario di un trasformatore. La tensione pulsante unipolare fornita dal raddrizzatore viene poi livellata mediante un filtro; si ottiene così una tensione di valore sostanzialmente costante, che potrà essere ancora ulteriormente stabilizzata.

Le diverse configurazioni circuitali sono illustrate in fig.1 accanto alle rispettive forme d'onda di uscita quando in ingresso sia applicato un segnale sinusoidale di ampiezza V_{sM} e valore efficace V_s . L'esame di ciascun tipo di raddrizzatore consente di comprenderne il funzionamento e di calcolare il valore medio V_{odc} del segnale di uscita. Al fine di semplificare l'analisi, si considerano il trasformatore e il diodo come elementi *ideali* ossia si trascurano la resistenza del secondario r_s e la caduta di tensione sul diodo in conduzione.



Raddrizzatore con un diodo. Il circuito è illustrato in fig.1a. Durante il semiciclo negativo di v_s , il diodo è polarizzato inversamente e pertanto la tensione di uscita è nulla. La semionda positiva di v_s viene invece trasferita all'uscita poiché il diodo è in conduzione. Per questo motivo il circuito è indicato anche come *raddrizzatore ad una semionda*. Si ricava per il segnale di uscita il valore medio

$$V_{odc} = V_{sM} / \pi \quad [1]$$

Raddrizzatore con due diodi. Il secondo circuito (fig.1b) richiede l'uso di un trasformatore a presa centrale in modo che la tensione ai capi del secondario venga ripartita esattamente e risulti $V_{AG} = -V_{BG}$. Si può pensare a questo circuito come all'insieme dei due raddrizzatori ad una semionda. Il diodo $D1$ conduce solo durante la semionda positiva di v_s e $D2$ conduce solo durante la semionda negativa di v_s . Le correnti i_1 e i_2 che scorrono rispettivamente in $D1$ e $D2$, percorrono R_L nello stesso verso; pertanto la corrente nel carico risulta $i_L = i_1 + i_2$. Poiché nel segnale di uscita sono presenti sia la semionda positiva sia quella negativa, il circuito è noto come *raddrizzatore a doppia semionda*. Ricordando che, in questo caso, la tensione V_{sM} rappresenta l'ampiezza della sinusoide ai capi di un semi-avvolgimento, si può ricavare il valore medio della tensione di uscita

$$V_{odc} = 2V_{sM} / \pi \quad [2]$$

Raddrizzatore con ponte di Graetz. Il circuito di fig.1c è anch'esso un *raddrizzatore a doppia semionda*, che non necessita di trasformatore a presa centrale, ma utilizza quattro diodi disposti secondo una particolare configurazione nota come *ponte di Graetz*. Durante il semiciclo positivo di v_s , la

corrente scorre in D1, R_L , D2, essendo questi due diodi polarizzati direttamente. Durante il semiciclo negativo, la corrente scorre in D3, R_L , D4 mentre D1 e D2 sono polarizzati inversamente. Il valore medio della tensione di uscita è ancora espresso dalla relazione

$$V_{odc} = 2V_{sM} / \pi \quad [3]$$

dove V_{sM} è l'ampiezza della sinusoide ai capi dell'intero avvolgimento secondario.

Questo circuito offre indubbiamente le prestazioni migliori.

ESEMPIO 1

Con riferimento a ciascuno dei tre circuiti illustrati in fig.1, considerando $R_L = 100\Omega$ e supponendo di utilizzare un trasformatore da 220: 6 + 6 V provvisto di presa centrale, calcolare i rispettivi valori medi della tensione di uscita.

SOLUZIONE

Il trasformatore fornisce alle estremità dell'avvolgimento secondario una tensione efficace $V_S = 12V$ e quindi una sinusoide con ampiezza $V_{sM} = \sqrt{2}V_S = 17V$.

Fra ciascuna estremità dell'avvolgimento e la presa centrale fornisce invece una tensione efficace $V_s = 6V$ e quindi una sinusoide con ampiezza $V_{sM} = 8.5V$

Applicando per i tre circuiti le rispettive eq. [1], [2], [3], si ricavano i seguenti valori.

Raddrizzatore con un diodo $V_{odc} = V_{sM} / \pi = 17 / \pi = 5.4V$

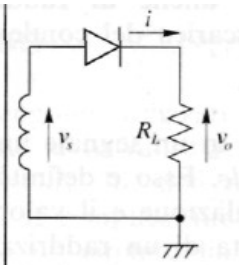
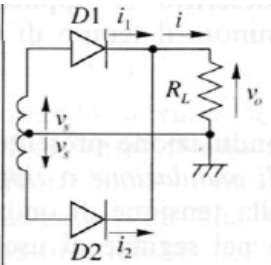
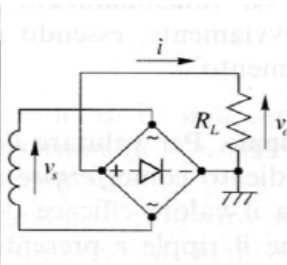
Raddrizzatore con due diodi $V_{odc} = 2V_{sM} / \pi = 2 \times 8.5 / \pi = 5.4V$

Raddrizzatore con ponte di Graetz $V_{odc} = 2V_{sM} / \pi = 2 \times 17 / \pi = 10.8V$

Si verifica che il valore medio della tensione di uscita più elevato si ottiene con il circuito a ponte di Graetz. Per ottenere lo stesso valore di V_{odc} con gli altri due circuiti occorrerebbe utilizzare un trasformatore con un numero di spire doppio al secondario.

Parametri principali

Per scegliere la configurazione circuitale più opportuna e dimensionare i diodi o il ponte, è bene considerare, oltre al valore medio V_{odc} già indicato, altre grandezze significative. In particolare occorre valutare le correnti massime I_{FM} o I_{DM} e le correnti medie $I_{F(AV)}$ o I_{dm} che vengono a scorrere nei diodi in conduzione. Quest'ultimo parametro deve essere confrontato con i_j corrispondente valore riportato sui fogli tecnici dei diodi raddrizzatori e dei ponti. È poi importante considerare le tensioni inverse massime V_{RRM} che vengono applicate in modo ripetitivo ai diodi polarizzati inversamente per accertarsi che i valori non superino quelli consentiti. In tab.1 sono riportate sinteticamente per ciascun circuito le espressioni delle grandezze citate.

Parametri	Simboli			
Valore medio della tensione di uscita	V_{odc}	$\frac{V_{sM}}{\pi}$	$\frac{2V_{sM}}{\pi}$	$\frac{2V_{sM}}{\pi}$
Corrente massima in ciascun diodo	I_{FM}	$\frac{V_{sM}}{R_L}$	$\frac{V_{sM}}{R_L}$	$\frac{V_{sM}}{R_L}$
Corrente media in ciascun diodo	$I_{F(AV)}$	$\frac{V_{sM}}{\pi R_L}$	$\frac{V_{sM}}{\pi R_L}$	$\frac{V_{sM}}{\pi R_L}$
Tensione inversa massima su ciascun diodo	V_{RRM}	V_{sM}	$2V_{sM}$	V_{sM}

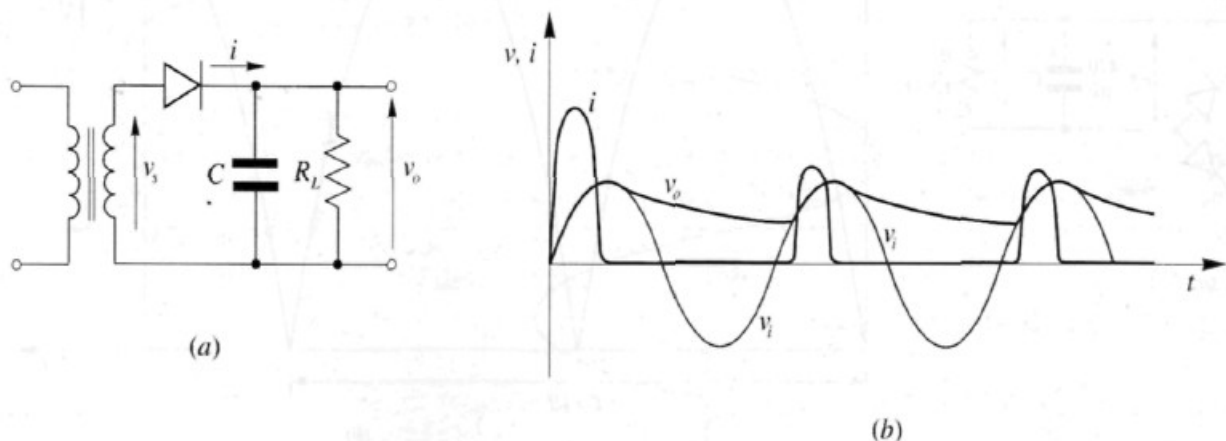
Tab. 1

Raddrizzatore con filtro capacitivo

La tensione pulsante fornita dai raddrizzatori viene quasi sempre livellata mediante un filtro.

In fig. 2 è illustrato un raddrizzatore ad una semionda con filtro capacitivo e carico R_L . Come risulta evidente dalle forme d'onda illustrate in fig. 2, durante il primo quarto di periodo, quando il diodo conduce, il condensatore si carica seguendo v_s fino al valore di picco V_{sM} . Al diminuire di v_s , il diodo si interdice e C si scarica parzialmente su R_L fino a che, nel successivo semiciclo positivo, v_s non raggiunge il valore della tensione sul condensatore. A questo punto il diodo ricomincia a condurre e il condensatore si ricarica seguendo v_s .

Si può osservare che l'ondulazione presente nel segnale di uscita è tanto minore quanto maggiore è la costante di tempo di scarica del condensatore. Pertanto, fissato il valore di R_L , occorre scegliere un condensatore di capacità sufficientemente elevata da garantire un buon livellamento.



In fig. 2 sono rappresentati anche i picchi della corrente che scorre nel diodo in conduzione. In particolare, durante la carica iniziale, la corrente che scorre in C, limitata solo dalla resistenza del secondario del trasformatore, dalla resistenza serie del condensatore e dalla bassissima r_f del diodo, può assumere valori considerevoli. Occorre pertanto confrontare tale corrente con i dati riportati dai fogli tecnici relativamente alla corrente I_{FSM} ovvero la massima corrente di picco non ripetitiva ammessa.

Il funzionamento descritto si applica anche ai raddrizzatori a doppia semionda. Ovviamente, essendo minore il tempo di scarica del condensatore, si ha un miglior livellamento.

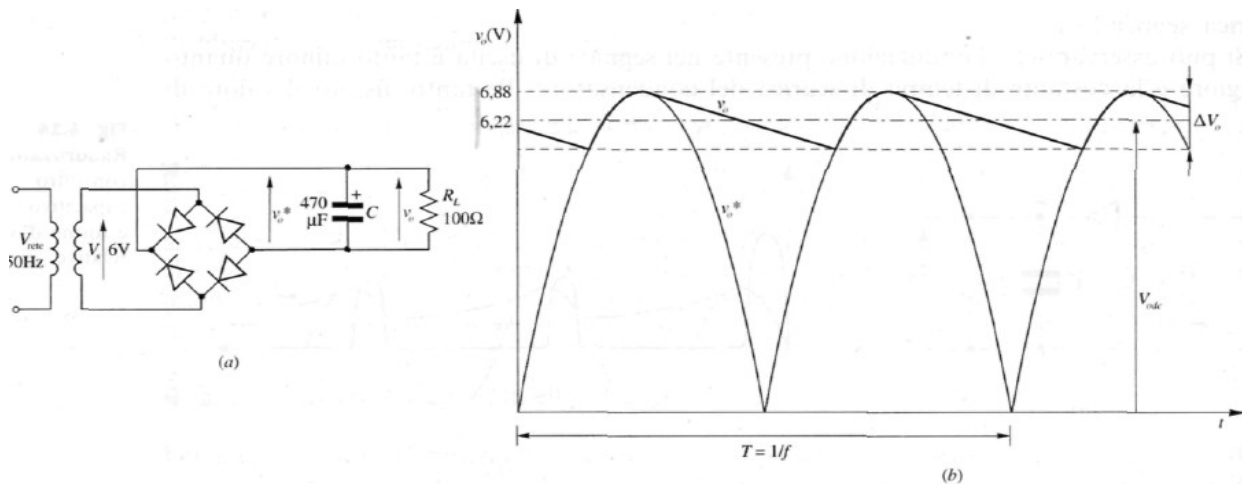
Ripple. Per valutare l'ondulazione presente in un segnale unipolare si introduce un fattore indicato come *fattore di ondulazione* o *ripple*. Esso è definito come il rapporto percentuale fra il valore efficace della tensione di ondulazione e il valore medio del segnale. Si ricava che il ripple r presente nel segnale di uscita di un raddrizzatore ad una semionda è pari al 121%, mentre per il raddrizzatore a doppia semionda il ripple scende al 48%.

Inserendo un *filtro capacitivo* a valle di un raddrizzatore a doppia semionda si ottiene un segnale di uscita sostanzialmente livellato con valore medio V_{odc} e un'ondulazione ΔV_0 molto ridotta; questa dipende ovviamente dalla frequenza f_r del segnale ondulado ($f_r = 2f$ ovvero il doppio della frequenza della tensione sinusoidale di ingresso), dalla capacità e dalla resistenza di carico. Si calcola in questo caso che il fattore di ripple è espresso con buona approssimazione dalla relazione

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3}fCR_L} = \frac{\Delta V_0}{2\sqrt{3}V_{odc}}$$

ESEMPIO 2

Il raddrizzatore a ponte di Graetz con filtro capacitivo illustrato in fig.3 fornisce in uscita una tensione con valore medio $V_{adt} = 6,22$ V. Calcolare il fattore di ripple r e l'ampiezza dell'ondulazione ΔV_0 . Disegnare la forma d'onda i^* che si ottiene scollegando la cella CR_L e la forma d'onda v_0 presente all'uscita del circuito completo.



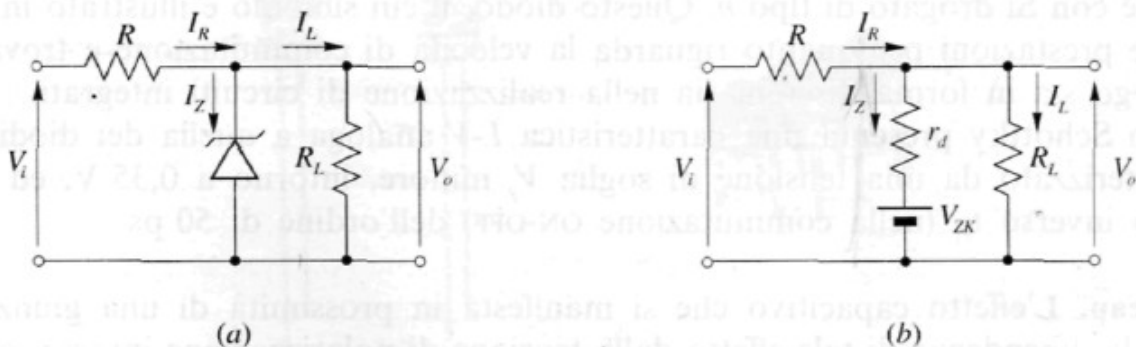
SOLUZIONE

Sostituendo i valori dei componenti nella eq. [4.10] si ricavano

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3} \times 50 \times 470 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^3} \simeq 0,06 \text{ (6\%)} \quad \Delta V_o = 2\sqrt{3}rV_{odc} \simeq 1,3 \text{ V}$$

e si disegnano le forme d'onda di fig. 4.15b.

Circuito stabilizzatore



In fig. è proposta una tipica struttura circuitale in cui lo Zener, polarizzato inversamente, funziona come stabilizzatore della tensione V_o contro variazioni della tensione V_i e del carico R_L , ossia della corrente I_L . Dovendo stabilizzare l'uscita V_o ad una certa tensione, si dovrà scegliere un diodo Zener con V_Z pari a quella tensione. Occorrerà poi dimensionare la resistenza R in modo che il diodo sia portato a lavorare nel tratto quasi verticale della curva caratteristica, dove ha luogo l'effetto stabilizzante.

Bisogna però osservare che lo stabilizzatore con diodo Zener presenta seri limiti quando la tensione di ingresso e la corrente I_L , assorbita dal carico sono soggette a forti variazioni.

Dimensionamento di R . La resistenza limitatrice R deve essere dimensionata tenendo conto delle variazioni possibili della corrente di carico I_L (o di R_L) e della tensione di ingresso V_i oltre che della tolleranza sul valore di V_Z , in modo che I_Z non scenda al di sotto del valore I_{ZK} e non superi il valore massimo $I_{Z(max)}$ imposto dalla massima dissipazione di potenza.

I valori di *massima potenza dissipabile* variano, a seconda dello Zener impiegato, fra qualche decimo e qualche decina di watt, a temperatura ambiente.

La resistenza R dovrà quindi assumere un valore compreso fra R_{max} ed R_{min} calcolate ponendosi nelle condizioni più sfavorevoli. Se V_f può variare fra $V_{i(min)}$ e $V_{i(max)}$ e V_Z fra V_{Zmin} e V_{Zmax} , I_L fra I_{Lmin} e I_{Lmax} , si avrà

$$R_{max} = \frac{V_{i(min)} - V_{Z(max)}}{I_{Z(min)} + I_{L(max)}} \quad R_{min} = \frac{V_{i(max)} - V_{Z(min)}}{I_{Z(max)} + I_{L(min)}}$$

Per la scelta del valore ottimale bisogna osservare che la variazione V_o al variare di V_i è tanto più limitata quanto più è elevato il valore di R . Il circuito illustrato può infatti essere ridisegnato dove lo

Zener è sostituito dal suo modello equivalente formato da un generatore V_{ZK} (*tensione di ginocchio*) in serie alla *resistenza dinamica* r_d . Si ricava quindi la tensione di uscita come

$$V_o = \frac{V_i - V_{ZK}}{R + r_d} r_d + V_{ZK} \quad \text{da cui} \quad V_o = \frac{V_i}{R + r_d} r_d - \frac{V_{ZK}}{R + r_d} r_d + V_{ZK}$$

Derivando rispetto a V_i l'eq. e considerando incrementi finiti, si ricava proprio la variazione di V_o al variare di V_o espressa dal *fattore di stabilizzazione* $\Delta V_o / \Delta V_i$. come

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} \approx \frac{dV_o}{dV_i} = \frac{r_d}{R + r_d}$$

Si può infine considerare che con un valore più elevato di R la zona di lavoro si sposta nella parte più alta della caratteristica; con R più bassa, la corrente che percorre lo Zener e quindi la potenza che esso deve dissipare è maggiore.

ESEMPIO 3

Con riferimento al circuito di fig. supponendo che V_i possa variare fra 13 e 15 V e I_L fra 10 e 50 mA, dimensionare R e il diodo Zener per ottenere in uscita una tensione stabile $V_o \cong 10$ V.

SOLUZIONE

Si sceglie un diodo Zener con V_z nominale pari a 10 V e tolleranza 2%; si avrà $V_{zmin}=9,8$ V e $V_{zmax}=10,2$ V. La potenza deve essere adeguata alle tensioni e correnti in gioco; con una potenza $P=1,5$ W, si ha $I_{zmax}=150$ mA. Per I_{zmin} si può assumere il valore $I_{z0}=1$ mA indicato dai fogli tecnici o meglio, un valore leggermente superiore, ad esempio dell'ordine del 5% della corrente massima. Scegliamo $I_{zmin}=7$ mA. Sostituendo nelle eq. si ottiene

$$R_{max} = (13V - 10,2V) / (7mA - 50mA) = 49\Omega$$

$$R_{min} = (15V - 9,8V) / (150mA - 10mA) = 32,5\Omega$$

Conviene scegliere $R=47\Omega$. Poiché la corrente I_R può raggiungere un valore massimo pari a $(15 - 9,8) / 47 = 110$ mA, R dovrà essere in grado di dissipare con largo margine almeno 600mW.