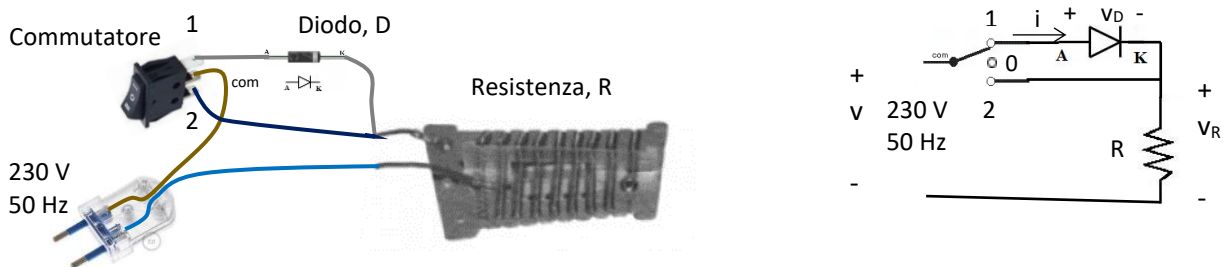


Modulo 24

Elettronica di potenza – Diodi

Problema 24.1: La resistenza elettrica di un soffiatore di aria calda (fon, dal tedesco "föhn", che significa vento secco e caldo) è alimentata dalla rete a 230 V, 50 Hz, attraverso un commutatore a tre posizioni come nella figura di sinistra e, in rappresentazione schematica circuitale, in quella di destra. Nella posizione 1, è inserito un diodo (che assumiamo reale) in serie alla resistenza. La resistenza ha un valore $R=95 \Omega$. La posizione centrale (0) rappresenta il circuito aperto.

Vogliamo trovare la potenza dissipata P dalla resistenza R nelle tre posizioni 1-0-2.



Posizione 0: Nella posizione 0 è evidente che il circuito è aperto, nessuna alimentazione viene portata alla resistenza e nessuna corrente circola in essa. Di conseguenza la potenza P sarà certamente nulla (corrisponde alla posizione nella quale il fon soffia aria fredda).

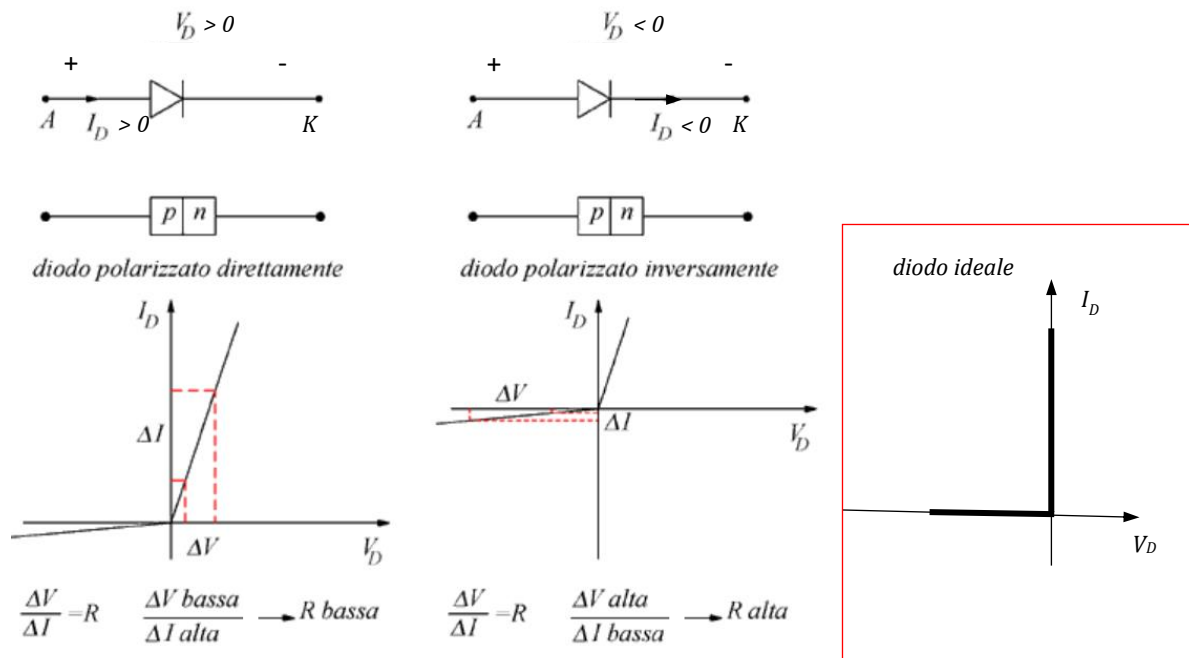
Posizione 2: Anche la 'posizione 2 è di facile studio. Con essa la tensione di rete prelevata, dalla spina, viene applicata al resistore. Assumendo che possiamo trascurare gli effetti induttivi (il resistore a file avrà anche una sua induttanza L cui corrisponde una reattanza X_L che dovrebbe però essere molto più piccola della resistenza R), possiamo allora assumere come ideale il bipolo resistivo e valutare la potenza attiva assorbita, e dissipata, con $(I=V/R)$:

$$P = \frac{V^2}{R} = I^2 R = \frac{230^2}{95} = 557 \text{ W}$$

Posizione 1: In questa posizione occorre considerare l'effetto del diodo. Quello che qui si assume è il comune "diodo a giunzione" che impiega il materiale Silicio, ampiamente utilizzato in quasi tutti i componenti elettronici, sia di potenza che di segnale.

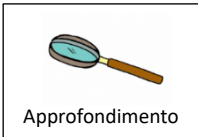
Il comportamento del diodo è corrispondente a quello di una "valvola unidirezionale in idraulica"; esso consente un flusso positivo di corrente elettrica I_D (nel verso suggerito dal simbolo a freccia del diodo)

senza opporre significativa resistenza R (quindi con tensione ai suoi capi trascurabile: diodo polarizzato positivamente) mentre ostacola il flusso di corrente I_D nel verso contrario (corrente negativa) mostrando in quel caso una alta resistenza elettrica (diodo polarizzato inversamente). In un piano tensione (orizzontale)/corrente (verticale) la caratteristica di un diodo è quella non lineare mostrata nella figura seguente.



Nel riquadro a destra è mostrata la caratteristica assunta per un diodo ideale: esso si presenta come un corto circuito (tensione nulla) per correnti positive e come un circuito aperto (corrente nulla) per tensioni negative.

Il **diodo raddrizzatore a giunzione** (o semplicemente *diodo*) è un componente elettronico a due terminali (*bipolo*), la cui funzione è quella di permettere il flusso di corrente elettrica in un verso e di bloccarla nell'altro. Il simbolo circuitale del diodo esprime chiaramente questa funzione: il triangolo indica la freccia di direzione in cui il flusso di corrente è possibile. I due terminali del diodo vengono detti **anodo (A)** e **catodo (K)**¹.

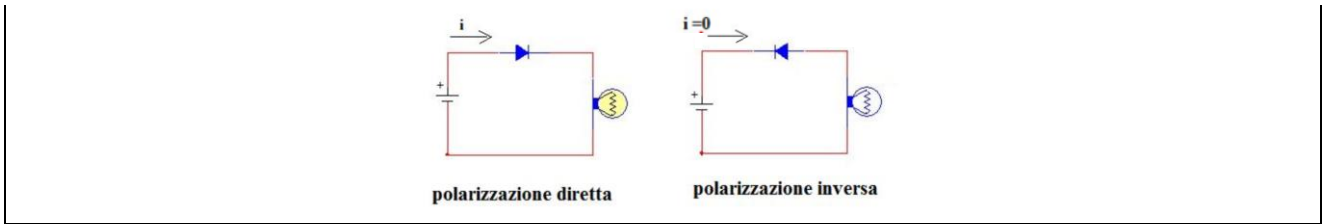


La figura qui sotto mette a confronto il simbolo circuitale del diodo con l'aspetto tipico di un diodo reale. Nella figura di sinistra è mostrata la configurazione "a vite"; in quella di destra "a disco, più per grandi correnti (fino a migliaia di ampere). Un'altra configurazione, per le correnti più piccolo, è quella della figura precedente.



Nella figura che segue viene confrontato un circuito (a sinistra) in cui il diodo conduce la corrente e fa accendere la lampadina, con un circuito (a destra) in cui il diodo non fa passare corrente (la lampadina rimane spenta).

¹ Cfr anche il buon sito <http://www.elemania.altervista.org/diodi/index.html>



Nel caso del problema che dobbiamo studiare, la tensione di alimentazione è sinusoidale e quindi con segni alternativamente positivo e negativo con l'alternanza che si sussegue a 50 Hz (50 periodi al secondo). Il circuito è essenzialmente resistivo e pertanto la corrente (convenzione di segno degli utilizzatori) rispetta il segno della tensione applicata. Nel semiperiodo di tensione applicata positiva, anche la corrente è positiva e il diodo la lascia scorrere presentandosi come un corto circuito ideale e consentendo che la tensione sia applicata al resistore R.

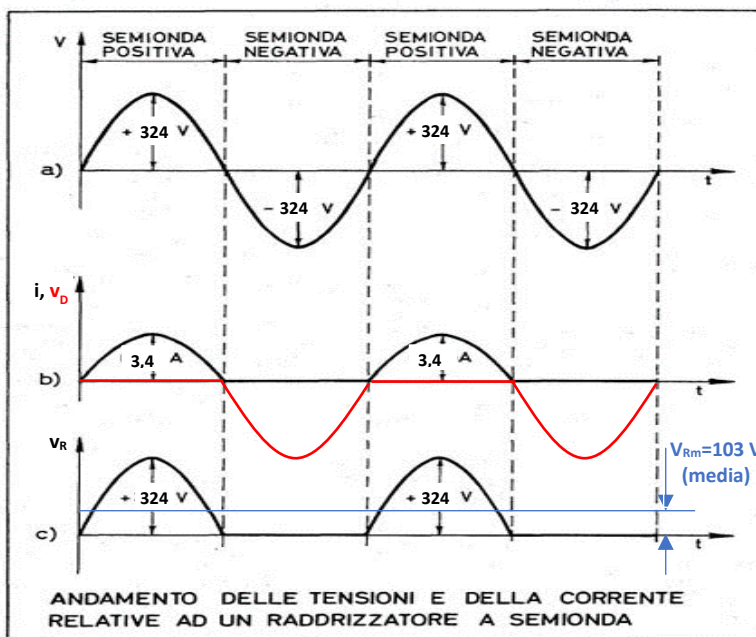
Nel semiperiodo di tensione applicata negativa invece, la corrente tenderebbe a diventare negativa, ma in tali condizioni il diodo si presenta come un circuito aperto che impedisce lo scorrere della corrente. Nessuna tensione risulta applicata al resistore R e tutta la tensione di rete cade sul diodo (polarizzandolo inversamente).

Le due condizioni sono riportate nella figura sottostante. Durante la semionda positiva della tensione di alimentazione (tensione di rete) la corrente è positiva, il diodo si comporta come un corto circuito ideale, la tensione ai capi del diodo è nulla e tutta la tensione di rete è applicata al resistore R. Il valore massimo della tensione è pari a V (è il valore efficace fornito dal testo)

$$V_M = \sqrt{2} V = \sqrt{2} 230 = 324 \text{ V}$$

La corrente segue lo stesso andamento nel tempo e ha un valore massimo pari a

$$I_M = V_M / R = 324 / 95 = 3.4 \text{ A.}$$



Durante la semionda negativa della tensione di alimentazione (tensione di rete) la corrente è nulla, non potendo diventare negativa perché il diodo si comporta come un corto aperto ideale. Se è nulla la corrente è nulla anche la tensione ai capi del resistore R e tutta la tensione di rete (negativa) è applicata al diodo D (con segno negativo) con una tensione massima di contropolarizzazione di 324 V (che il diodo deve essere in grado di sopportare senza alcuna scarica interna).

La forma d'onda della tensione sul diodo mostra che essa è ancora periodica di periodo $T=1/f$, ma non alternata in quanto ha solo valori positivi e quindi un valore medio diverso da zero. Il valore medio $V_{R,m}$ è, per definizione, pari all'area sottesa da una semionda ($V_M T/\pi$) divisa per il periodo T

$$V_{R,m} = \frac{1}{\pi} V_M = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V = 0.45 V = 0.45 \cdot 230 = 103 \quad V \quad (\text{valor medio})$$

Il coefficiente $\frac{\sqrt{2}}{\pi} = 0.45$ è detto *coefficiente di conversione del raddrizzatore a semionda su carico resistivo*.

Nel caso del circuito di figura esso risulta quindi pari a 103 V. Il circuito che abbiamo studiato è capace di trasformare (convertire) una tensione alternata, quindi a valor medio nullo, in una tensione con valor medio diverso da zero, precisamente contenente una componente continua diversa da zero (il suo valor medio appunto). *Convertitori elettronici di potenza che fanno questa funzione (conversione CA/CC) si chiamano "raddrizzatori"*. Nello specifico quello studiato è un *raddrizzatore a semionda*, che si usa solo per applicazioni a basso costo e di bassa potenza.

Assieme alla tensione media avremo anche una corrente media (tensione e corrente hanno la stessa forma d'onda) pari a

$$I_{R,m} = \frac{1}{\pi} I_M = \frac{V_{R,m}}{R} = \frac{103}{95} = 1.08 \quad A \quad (\text{valor medio})$$

Per il calcolo della potenza media (attiva) possiamo osservare che durante la semionda positiva abbiamo la stessa dissipazione che si ottiene con il regime sinusoidale, mentre durante la semionda negativa la dissipazione è nulla. Mediamente allora possiamo scrivere:

$$P = 0.5 \frac{V^2}{R} = 0.5 \frac{230^2}{95} = 279 \quad W$$

Ci ricordiamo la definizione generale dei valori efficaci delle grandezze periodiche; la tensione efficace è quel valore di tensione continua che applicato alla stessa resistenza produce la stessa potenza media. Allora deve valere:

$$P = \frac{1}{2} \frac{V^2}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_M}{\sqrt{2}} \right)^2 \frac{1}{R} = \frac{V_M^2}{4} \frac{1}{R} = \frac{V_{R,eff}^2}{R}$$

da cui

$$V_{R,eff} = \frac{V_M}{2} = \frac{324}{2} = 163 \text{ V (valore efficace)}$$

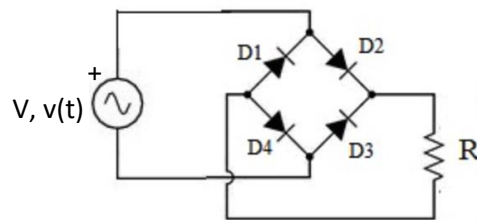
Riconosciamo che per la forma d'onda in questione sussiste la relazione

$$V_{R,eff} = \frac{V_M}{2} = \frac{\pi V_{R,m}}{2} = \frac{\pi}{2} V_{R,m} = 1.57 V_{R,m}$$

Analogamente

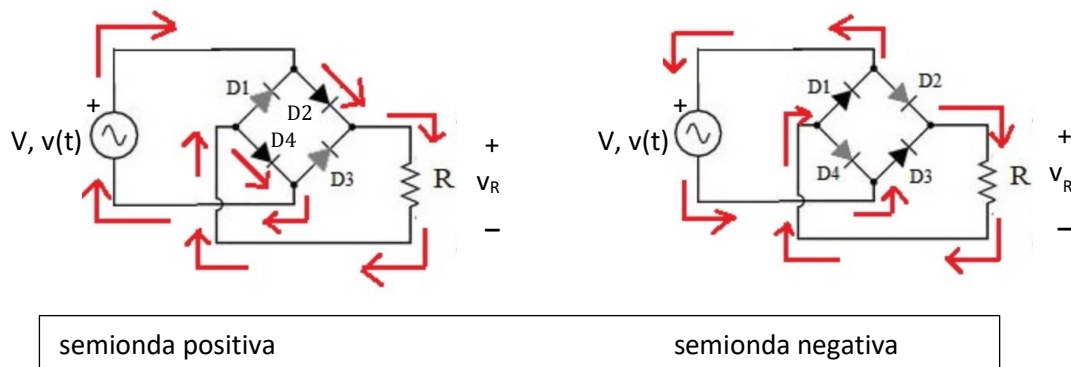
$$I_{R,eff} = 1.57 I_{R,m}$$

Problema 24.2: Un ponte di Graetz monofase (vedi figura sotto), alimentato con una tensione sinusoidale di valore efficace $V=110 \text{ V}$ e con frequenza $f=60 \text{ Hz}$, è connesso ad un resistore con resistenza $R=24 \Omega$.



Studiare la forma d'onda delle tensioni e delle correnti nei vari rami e calcolare la potenza (media) P assorbita dal resistore.

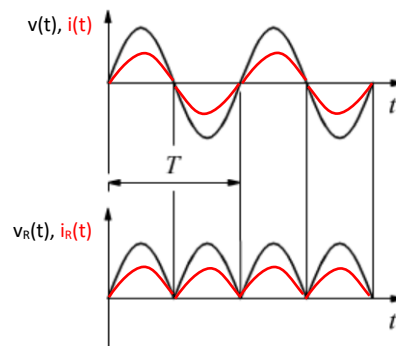
Il ponte di Graetz (Grätz) è un circuito *raddrizzatore* di ampio utilizzo e dalle prestazioni più performanti rispetto a quelle del semplice raddrizzatore a semionda del Problema 24.1. Mediante l'uso di 4 diodi, esso consente di alimentare il resistore sia durante la semionda positiva della tensione di alimentazione che durante quella negativa, sempre presentando tuttavia tensione solo positiva su carico R .



Possiamo comprendere tale comportamento con l'ausilio della figura sopra riportata.

Durante la semionda positiva della tensione di alimentazione $v(t)$ (figura a sinistra), il funzionamento è come quello di un raddrizzatore a semionda con la differenza che oltre al diodo D2 disposto sul conduttore positivo dell'alimentazione c'è anche il diodo D4 su quello negativo. *Durante la semionda positiva dell'alimentazione, la tensione sul carico (tensione all'uscita del ponte) coincide con la tensione di alimentazione: $v_R(t) = v(t)$.*

Durante la semionda negativa della tensione di alimentazione $v(t)$ (figura a destra), il funzionamento è come quello di un raddrizzatore a semionda con la sola differenza che ora sono coinvolti i diodi D1 e D3 inseriti uno sul conduttore del morsetto positivo dell'alimentazione e l'altro sul conduttore del morsetto negativo, ma con versi di conduzione invertiti, quindi coerenti con il verso della corrente che il generatore tende a far circolare. Inoltre il morsetto positivo del resistore è connesso al morsetto negativo del generatore e viceversa, producendo un rovesciamento del segno della tensione. *Durante la semionda negativa dell'alimentazione, la tensione sul carico (tensione all'uscita del ponte) coincide con la tensione di alimentazione cambiata di segno: $v_R(t) = -v(t)$.*



Combinando le due conclusioni, possiamo tracciare gli andamenti della tensione di alimentazione $v(t)$ e di quella su resistore $v_R(t)$ mostrati nella figura sopra. Riconosciamo che la $v_R(t)$ è unidirezionale (sempre dello stesso segno) pari al valore assoluto della $v(t)$, si dice che è pari alla $v(t)$ raddrizzata. Il valore medio $V_{R,m}$ della $v_R(t)$ è pari al valore medio di una semionda di una funzione sinusoidale e cioè (V è il valore efficace fornito dal testo):

$$V_{R,m} = \frac{2}{\pi} V_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V = 0.9 V = 0.9 \cdot 110 = 99 \quad V \quad (\text{valor medio})$$

Il coefficiente $\frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0.9$ è detto *coefficiente di conversione del ponte di Graetz monofase*.

Con carico puramente resistivo, l'andamento della corrente in esso sarà corrispondente a quello della tensione, $i_R(t) = v_R(t)/R$ come disegnato in figura. Assieme alla tensione media avremo anche una corrente media (tensione e corrente hanno la stessa forma d'onda) pari a

$$I_{R,m} = \frac{2}{\pi} I_M = \frac{V_{R,m}}{R} = \frac{99}{24} = 4.13 \quad A \quad (\text{valor medio})$$

Per il calcolo della potenza media (attiva) possiamo osservare che durante la semionda positiva abbiamo la stessa dissipazione che si ottiene con il regime sinusoidale; e così anche durante la semionda negativa.

Mediamente allora possiamo dire di avere la stessa potenza del regime sinusoidale (d'altra parte la potenza dipende dal quadrato della tensione o della corrente e quindi nulla cambia se le grandezze sono sinusoidali o raddrizzate):

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{110^2}{24} = 504.2 \text{ W}$$

Osserviamo che la potenza media non è pari al prodotto dei valori medi della tensione e della corrente nel resistore: $V_{R,m} \cdot I_{R,m} = 99 \cdot 4.13 = 409 \text{ W!}$

Ci ricordiamo la definizione generale dei valori efficaci delle grandezze periodiche; la tensione efficace è quel valore di tensione continua che applicato alla stessa resistenza produce la stessa potenza media. Allora deve valere:

$$P = \frac{V^2}{R} = \left(\frac{V_M}{\sqrt{2}}\right)^2 \frac{1}{R} = \frac{V_{R,eff}^2}{R}$$

da cui

$$V_{R,eff} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} = V = 110 \text{ V (valore efficace)}$$

Riconosciamo che per la forma d'onda in questione sussiste la relazione

$$V_{R,eff} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} = \frac{\pi V_{R,m}}{2\sqrt{2}} = 1.11 V_{R,m}$$

Analogamente

$$I_{R,eff} = 1.11 I_{R,m}$$

Infine possiamo esaminare anche la corrente $i(t)$ nel generatore di alimentazione (a volte si dice: corrente di rete o corrente lato alternata). Dallo studio del comportamento dei diodi prima fatto troviamo facilmente che vale $i(t) = i_R(t)$ durante la semionda positiva della $v(t)$ mentre $i(t) = -i_R(t)$ durante quella negativa. A fronte di una corrente unidirezionale nel resistore abbiamo una corrente alternata (valore medio nullo) sinusoidale nell'alimentazione, con gli stessi valori massimo ed efficace.

Note conclusive

- a) Esistono molti altri schemi per raddrizzatori a diodi, sia con alimentazione monofase, che trifase che polifase. Per ciascuno di essi esiste un proprio coefficiente di conversione che lega la tensione media di uscita con il valore efficace della tensione alternata di alimentazione.
- b) Le forme d'onda, in particolare delle correnti, dipendono dalla natura del carico: R oppure RL serie, RC parallelo, RLE serie ecc.
- c) Esistono anche "diodi controllati" (detti anche tiristori o thyristor o SCR). Sono diodi la cui entrata in conduzione (diretta) deve essere abilitata da un segnale di comando. Dopo essere entrati in conduzione si comportano come diodi normali (non controllati). Al primo spegnimento, tornano nello stato di riposo e possono ritornare nel funzionamento da diodo solo se abilitati dal segnale esterno di comando. Consentono di realizzare raddrizzatori con tensione media di uscita regolabile partendo da tensione alternata di alimentazione avente valore efficace fisso.
- d) I diodi non controllati e i diodi controllati fanno parte degli "interruttori (statici) elettronici di potenza" (switch) basati sulla tecnologia dei semiconduttori al Silicio (solitamente). Esistono anche interruttori elettronici comandabili sia in accensione che in spegnimento mediante un comando esterno. Sono denominati con gli acronimi GTO, IGBT, MOSFET, MCT, IGCT ecc a seconda della struttura interna. Si comportano come interruttori che possono essere chiusi o aperti su comando.
- e) Con gli interruttori controllati in apertura e chiusura, si realizzano convertitori alternata-continua, continua-alternata, continua-continua ed anche alternata-alternata, con articolate e sofisticate strategie di controllo.
- f) Esistono interruttori elettronici di potenza capaci di condurre correnti di alcune migliaia di ampere e capaci di sostenere tensioni, quando non sono in conduzione, di alcune migliaia di volt.