

## ELETTRONICA INDUSTRIALE DI POTENZA

## Esercitazione 3

**PROGETTO TECNICO-ECONOMICO DI UN CONVERTITORE  
CA-CC CON ALIMENTAZIONE MONOFASE**

Si chiede il dimensionamento di un convertitore c.a.-c.c. avente le seguenti caratteristiche:

- ✓ tensione di alimentazione monofase:  $V_1 = 230 \text{ Vca}$
- ✓ tensione teorica continua:  $V_D = 100 \text{ V}$
- ✓ corrente continua nominale:  $I_d = 130 \text{ A}$
- ✓ schema a presa centrale o a ponte

Il progetto deve essere effettuato con il criterio del minimo costo, sulla base dei dati economici forniti nel seguito:

- ✓ Diodi: sono disponibili semiconduttori aventi le seguenti caratteristiche:  
 $I_{F(AV)} = 25; 50; 100 \text{ A}$   
 $V_{RWM} = 100 \text{ V}; 200 \text{ V}; 400 \text{ V}$
- ✓ Caduta diretta diodi:  $V_F = 1 + 0,3 \cdot (I/I_{F(AV)}) \text{ [V]}$
- ✓ Costo di un diodo:  $5000 + 300 \cdot [I_{F(AV)} + 0,2 \cdot V_{RWM}] \text{ [€]}$
- ✓ Trasformatore:  
 Perdite: Ferro:  $0,01 \cdot A_n$ , Rame:  $0,04 \cdot A_n$  (potenza apparente alla corrente  $I_n$ )  
 Costo trasformatore  $20 \cdot A_n \text{ [€]}$

Dove  $€$  = lire convenzionali.

Capitalizzazione delle perdite 300 € per W

Costo totale = costo diodi + costo trasformatore + costo perdite capitalizzate (in €)

## OSSERVAZIONI INIZIALI

Con questa esercitazione si vuol progettare un convertitore c.a.-c.c. monofase a diodi basandosi sul criterio del minimo prezzo; gli schemi circuitali che si possono usare sono due: a **presa centrale** e a **ponte di Graetz**.

Per poter confrontare rapidamente le due soluzioni si valuterà il costo di entrambe in lire convenzionali  $\text{£}_C$  (per ottenere il controvalore in Euro sarà sufficiente dividere per 1936,27  $\text{€}/\text{£}$ ), questo permette di semplificare i conti e di favorire un rapido raffronto.

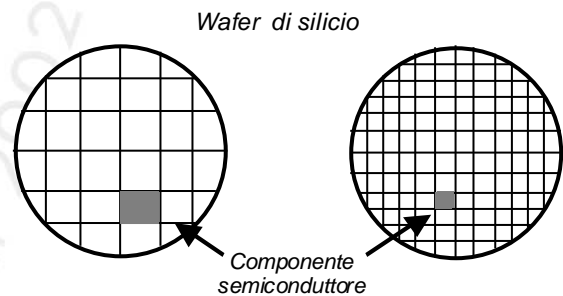
Il prezzo di ogni singolo diodo sarà valutato utilizzando la formula data dal teso, infatti con questa espressione si tiene facilmente conto sia dei costi fissi, sia dei costi variabili per la realizzazione di un singolo diodo in funzione delle sue caratteristiche elettriche. Analizziamo i due contributi:

- ✓ il contributo fisso di 5'000  $\text{£}_C$ , si riferisce al prezzo del "**case**" che conterrà la valvola, esso è indipendente dalle caratteristiche elettriche del semiconduttore quali portata e tensione di break-down;
- ✓ il contributo variabile è la somma di altri due termini: un fattore preponderante è proporzionale alla **portata** richiesta al semiconduttore, ed un fattore meno influente è proporzionale alla **tensione di break-down**.

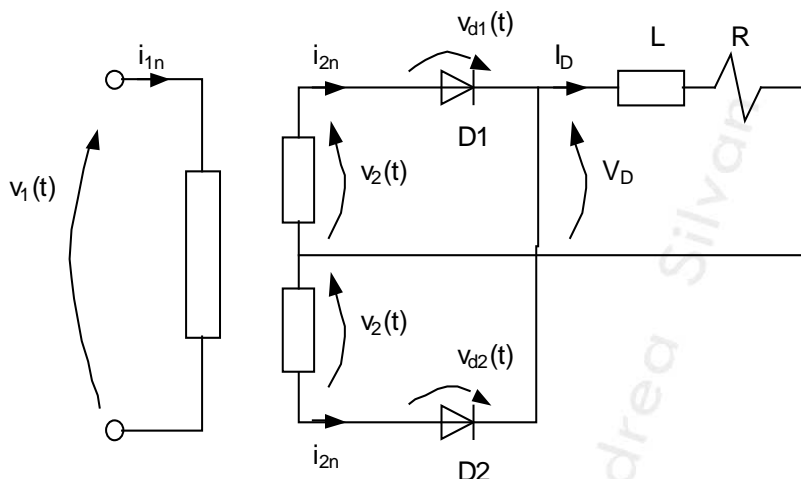
Si può osservare che nei piccolo semiconduttori il prezzo dipende essenzialmente dal case, mentre salendo con le tensioni inverse e soprattutto con le portate, quello che incide maggiormente è il costo variabile.

La proporzione fra prezzo e portata è dovuta alle difficoltà costruttive che si riscontrano per ottenere semiconduttori di grosse dimensioni, questi infatti sono ritagliati da wafer di silicio che devono avere un alto grado di purezza; se perciò un wafer contiene un difetto, il costruttore lo potrà comunque utilizzare per ricavare componenti di piccole dimensioni e scartare il pezzo contenente l'impurezza, mentre per realizzare un componente di dimensioni confrontabili a quelle dell'intero disco di silicio il costruttore dovrà necessariamente utilizzare un wafer perfettamente puro con un conseguente aumento di prezzo.

Analizziamo ora il funzionamento dei due circuiti e le varie caratteristiche.



## SCHEMA A PRESA CENTRALE



Questo circuito è costituito da un trasformatore con una presa centrale al secondario a cui è collegato un morsetto del carico, ai morsetti esterni del secondario sono poi collegati due diodi in senso equiverso ed il catodo di entrambi è collegato al morsetto rimanente del carico.

Quando in ingresso si presenta la semionda positiva il diodo  $D_1$  è polarizzato direttamente ed entra in conduzione, sul carico sarà applicata una semionda positiva di tensione. Quando in ingresso finisce la semionda positiva e  $v_1(t)=0$ , anche  $v_2(t)=0$  e non circola corrente, ma immediatamente dopo, quando inizia la semionda negativa il diodo  $D_2$  entra in conduzione infatti la tensione fra il suo anodo e la presa centrale diventa positiva, quindi il carico vede una seconda semionda positiva di tensione. Terminata la semionda negativa in ingresso il diodo  $D_2$  smette di condurre e si ripresenta la situazione iniziale in cui ricomincia a condurre  $D_1$ .

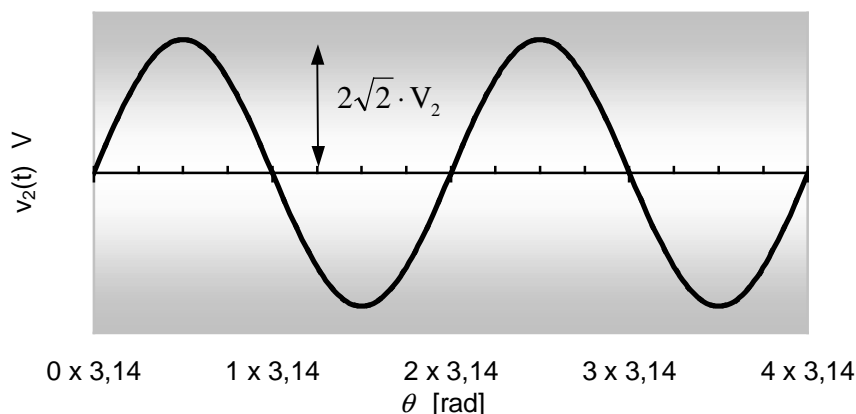
In conclusione il carico vede una sequenza di semionde positive di tensione.

La presenza di una "L" (*induttanza*) nel carico contribuisce a spianare la corrente che assume quindi un andamento quasi continuo ed unidirezionale nel carico; la corrente  $I_d$  sarà fornita per mezzo periodo dal ramo superiore e per il restante mezzo periodo dal ramo inferiore, di conseguenza le fasi del secondario del trasformatore sono attraversate da due semionde rettangolari contropulse di ampiezza  $I_d$  e conduzione  $180^\circ$ , il primario del trasformatore sarà quindi attraversato da una *corrente alternata rettangolare* somma delle due unidirezionali nel secondario.

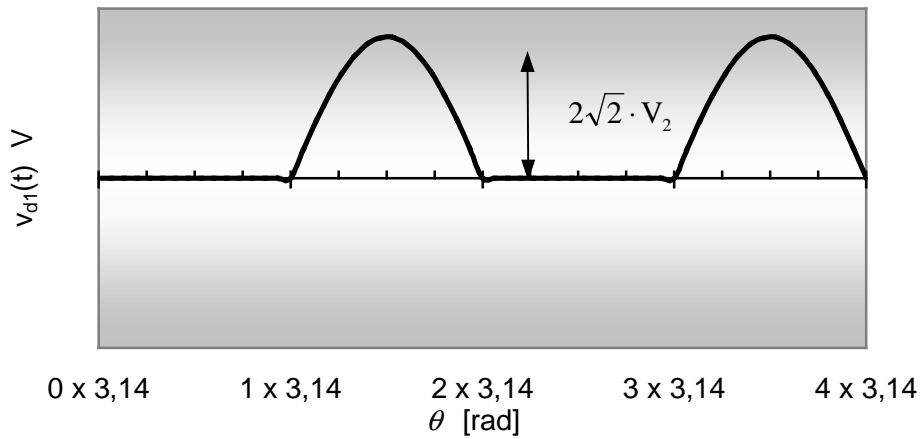
Si osserva che la massima tensione inversa a cui è sottoposto un diodo durante il semiperiodo di blocco è pari al valore di picco della semionda tensione e quindi pari a  $2\sqrt{2} \cdot V_2$ .

Analizzando il circuito durante il suo funzionamento sopra descritto possiamo tracciare i grafici temporali delle tensioni al secondario e delle correnti nei diodi:

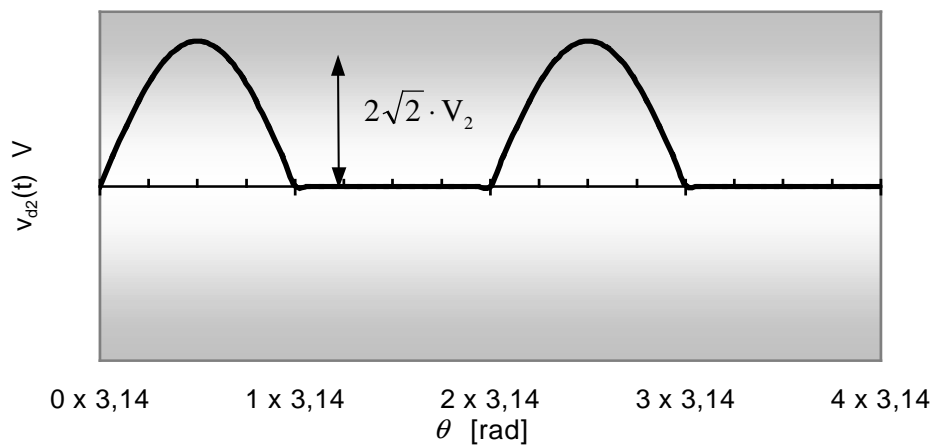
### TENSIONE SECONDARIA:



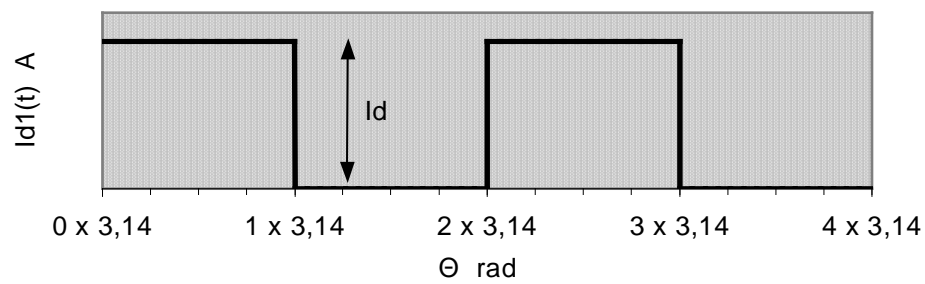
**TENSIONE AI CAPI DEL DIODO  $D_1$ :**



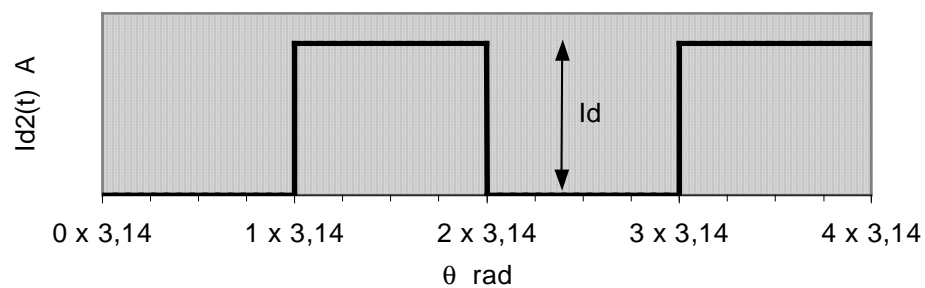
**TENSIONE AI CAPI DEL DIODO  $D_2$ :**



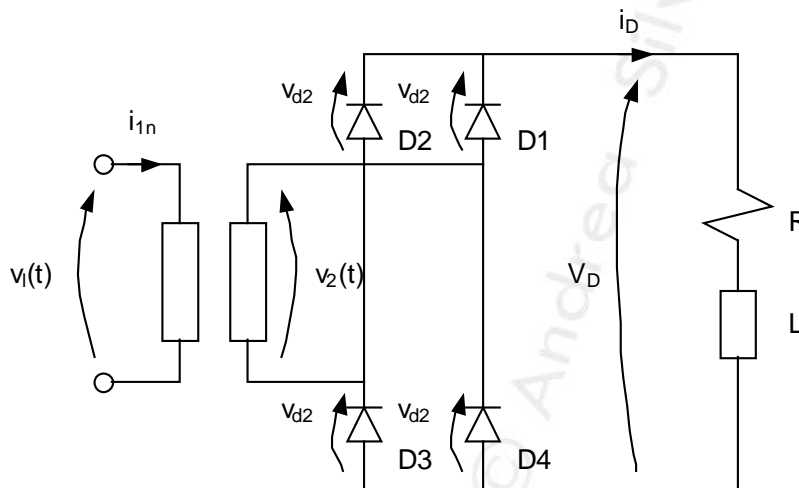
**CORRENTE NEL DIODO  $D_1$ :**



**CORRENTE NEL DIODO  $D_2$ :**



## SCHEMA A PONTE DI GRAETZ



Un vantaggio di questa scelta circuitale è la possibilità di usare un comune trasformatore diversamente dal tipo a presa centrale necessario per lo schema precedente.

Analizziamo il funzionamento:

quando in ingresso si presenta la semionda positiva gli unici diodi che possono condurre sono  $D_1$  e  $D_3$ , la corrente circola perciò nella maglia costituita dall'avvolgimento secondario,  $D_1$ , carico "R-L" (*Ohmico-induttivo*) e  $D_3$ . Quando termina la prima semionda la tensione si annulla, i due diodi tornano nello stato di blocco e non circola corrente. Nell'istante successivo inizia il secondo semiperiodo caratterizzato dalla semionda negativa; gli unici diodi che possono condurre sono  $D_2$  e  $D_4$ , la corrente circola perciò nella maglia costituita dall'avvolgimento secondario,  $D_2$ , carico "R-L" e  $D_4$ .

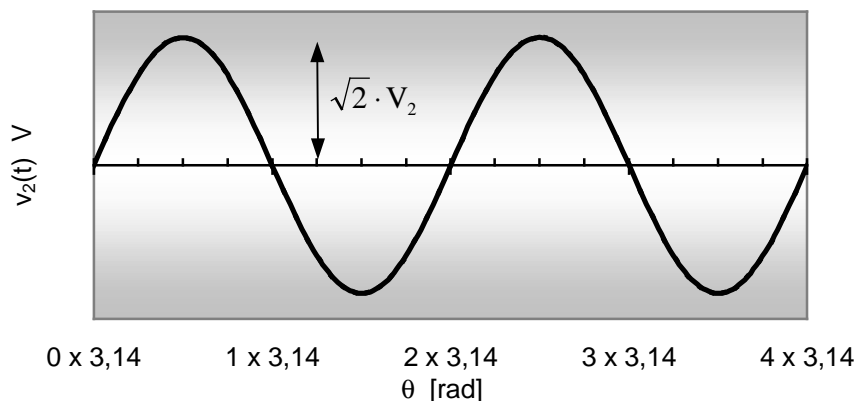
In conclusione al carico è applicata una tensione costituita da una sequenza di semionde positive e vista la presenza dell'induttanza "L", la corrente  $i_D$  può considerarsi "spianata".

Per quanto riguarda il secondario del trasformatore esso è percorso da due *semionde rettangolari controse* di durata  $180^\circ$  ( $T/2$ ).

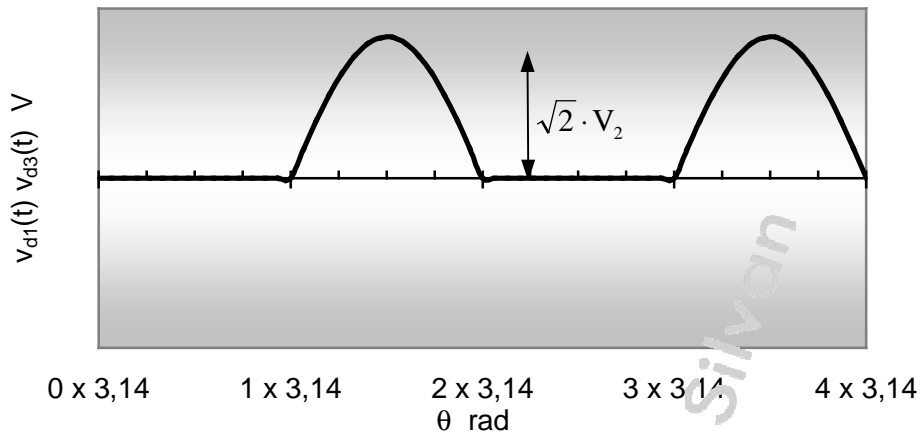
Osservando le tensioni a cui è sottoposta nel primo semiperiodo la coppia di diodi  $D_2$  e  $D_4$  mentre conducono  $D_1$  e  $D_3$ , si ricava che la massima tensione inversa a cui è sottoposto ciascun diodo è pari al valore di picco della tensione secondaria, e quindi pari a  $\sqrt{2} \cdot V_2$ .

Analizzando il circuito durante il suo funzionamento possiamo tracciare i grafici temporali delle tensioni al secondario e delle correnti nei diodi.

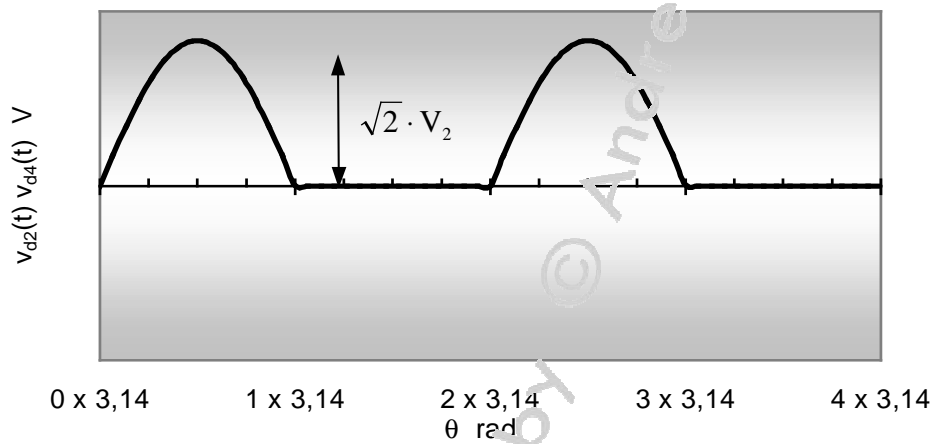
### TENSIONE SECONDARIA:



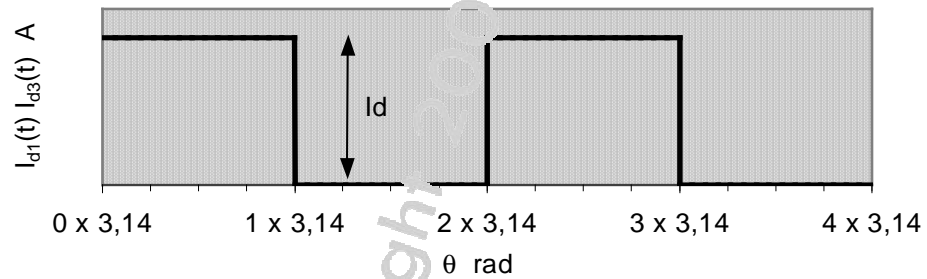
**TENSIONE AI CAPI DEI DIODI  $D_1$  E  $D_3$ :**



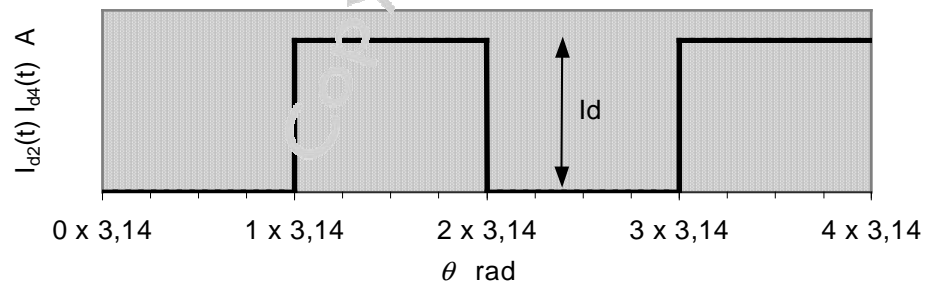
**TENSIONE AI CAPI DEI DIODI  $D_2$  E  $D_4$ :**



**CORRENTE NEI DIODI  $D_1$  E  $D_3$ :**



**CORRENTE NEI DIODI  $D_2$  E  $D_4$ :**



## DIMENSIONAMENTO DEI DUE CIRCUITI

### Schema a presa centrale

$$V_{D,media} = V_{2,eff} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = \frac{V_{2,eff}}{1,11}$$

$$n = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = \frac{V_{1,eff}}{V_{2,eff}} = \frac{V_{1,eff}}{V_{D,media} \cdot 1,11} \quad \leftarrow \text{Rapporto tra le spire primarie e di ciascuno dei due avvolg. secondari}$$

$$i_{D1,eff} = i_{D2,eff} \frac{i_D}{\sqrt{2}} = i_{2n} \quad \leftarrow \text{Corrente efficace che transita nei diodi e nell'avv. secondario}$$

$$i_{1n} = i_D \frac{V_{2n}}{V_{1n}} = i_D \frac{V_{D,media} \cdot 1,11}{V_{1,eff}}$$

$$A_n = \frac{1}{2} \left( V_{1,eff} \cdot i_{1n} + 2 \frac{V_{1,eff} \cdot i_{2n}}{n} \right) = \frac{1}{2} \left( V_{1,eff} \cdot i_D \frac{V_{D,media} \cdot 1,11}{V_{1,eff}} + 2 V_{1,eff} \frac{i_D}{\sqrt{2}} \frac{V_{D,media} \cdot 1,11}{V_{1,eff}} \right)$$

$$A_n = V_{D,media} \cdot i_D \cdot 1,34$$

### Schema a ponte

$$V_{D,media} = V_{2,eff} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = \frac{V_{2,eff}}{1,11}$$

$$n = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = \frac{V_{1,eff}}{V_{2,eff}} = \frac{V_{1,eff}}{V_{D,media} \cdot 1,11}$$

$$i_{2n} = i_D \quad \leftarrow \text{L'avvolgimento porta tutta la corrente che transita nel carico}$$

$$i_{1n} = i_D \frac{V_{2n}}{V_{1n}} = i_D \frac{V_{D,media} \cdot 1,11}{V_{1,eff}}$$

$$A_n = \frac{1}{2} (V_{1,eff} \cdot i_{1n} + V_{2,eff} \cdot i_{2n}) = \frac{1}{2} \left( V_{1,eff} \cdot i_D \frac{V_{D,media} \cdot 1,11}{V_{1,eff}} + V_{D,media} i_D \cdot 1,11 \right)$$

$$A_n = V_{D,media} \cdot i_D \cdot 1,11$$

Si possono trarre le prime osservazioni:

- ✓ nel ponte di Graetz il trasformatore può essere di potenza inferiore;
- ✓ il trasformatore del circuito a presa centrale oltre a essere di potenza maggiore deve avere anche due avvolgimenti secondari;
- ✓ nel circuito a presa centrale il numero di diodi è inferiore.

Con i dati del testo si ottengono i seguenti risultati:

|                       | $I_{1n}$ [A] | $I_{2n}$ [A] | $V_1$ [V] | $V_{2eff}$ [V] | $n$  | $A_n$ [VA]    |
|-----------------------|--------------|--------------|-----------|----------------|------|---------------|
| <b>Presa centrale</b> | 62,7         | 2x91,9       | 230       | 2x111          | 2,07 | <b>17 420</b> |
| <b>Ponte intero</b>   | 62,7         | 130          | 230       | 111            | 2,07 | <b>14 430</b> |

Da osservare la differenza di potenza fra ingresso  $I_{1n} \times V_1$  e la potenza in uscita  $i_{Dn} \times V_D$ ; la differenza si spiega osservando che dalla rete preleviamo un'onda quadra di corrente

scomponibile mediante Fourier in sinusoidi. L'armonica fondamentale trasporta potenza mentre le rimanenti armoniche di ordine superiore trasportano solo potenza istantanea senza dar contributo alla potenza media trasmessa al carico.

Si considera ora l'analisi delle perdite, per ricavare poi il costo complessivo del trasformatore del circuito raddrizzatore:

Utilizzando le formule date dal testo si possono determinare le varie perdite e le relative capitalizzazioni:

|                       | Perdite ferro<br>$P_{fe}$ [W] | Perdite rame<br>$P_{cu}$ [W] | Perdite tot.<br>$P_{fe}+P_{cu}$ [W] | Capitalizz.<br>perdite<br>[k£c] | Costo trasfo<br>[k£c] | Costo tot.<br>[k£c] |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|
| <b>Presa centrale</b> | 174,2                         | 696,8                        | <b>871,0</b>                        | 261,3                           | 348,4                 | <b>609,7</b>        |
| <b>Ponte intero</b>   | 144,3                         | 577,2                        | <b>721,6</b>                        | 216,48                          | 288,6                 | <b>505,8</b>        |

Ora resta da stimare il costo in lire convenzionali dei semiconduttori per entrambe le soluzioni. Innanzitutto bisogna stabilire che tipo e la quantità di valvole da collegare in parallelo fra quelle proposte dal testo.

Si procede ora alla scelta della portata e di conseguenza al numero di diodi da collegare in parallelo; supponendo poi che i diodi siano percorsi tutti dalla stessa forma d'onda di corrente, si calcola la corrente media:

$$i_{f,av} = \frac{i_D}{2} = 65A$$

Valutiamo ora la scelta della  $V_{RWM}$  fra le tre proposte, in particolare la  $V_{RWM}$  dovrà essere maggiore alla massima tensione inversa a cui sono sottoposti i diodi, nei due casi e vale rispettivamente:

$$V_{Diodo-presa-centrale} = 2\sqrt{2}V_{2,eff} = 2\sqrt{2} \cdot 1,1V_d = 314V$$

$$V_{Diodo-ponte-graetz} = \sqrt{2}V_{2,eff} = \sqrt{2} \cdot 1,1V_d = 157V$$

Si effettua la seguente scelta dimensionale:

- Presa centrale diodi con  $V_{RWM} = 400V$
- Ponte di Graetz diodi con  $V_{RWM} = 200V$

Utilizzando la formula fornita col testo e considerando le scelte di  $V_{RWM}$  fatte valutiamo quale è la portata dei diodi che consente di realizzare i circuiti raddrizzatori a minor costo; calcoliamo perciò i vari costi.

### Schema a presa centrale

Costo di ogni ramo:

$$n_{diodi,parallelo} \cdot [5000 + 300(I_{FAV} + 0,2 \cdot 400)]$$

Il costo totale dei diodi si ottiene moltiplicando per il numero di rami, ossia 2.

### Schema a ponte

Costo di ogni ramo:

$$n_{diodi,parallelo} \cdot [5000 + 300(I_{FAV} + 0,2 \cdot 200)]$$

Il costo totale dei diodi si ottiene moltiplicando per il numero di rami, ossia 4.



La tabella a seguito riporta i valori dei costi calcolati per tre portate:

| Portata diodi [A] | Diodi in parallelo per ramo | PRESA CENTRALE              |                          | PONTE INTERO                |                          |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|                   |                             | Costo perdite di ramo [k£c] | Costo tot. Perdite [k£c] | Costo perdite di ramo [k£c] | Costo tot. Perdite [k£c] |
| 25                | 3                           | 109                         | 219                      | 73,5                        | 294                      |
| 50                | 2                           | 88                          | 176                      | 64                          | 256                      |
| 100               | 1                           | 59                          | 118                      | 47                          | 188                      |

Dai i totali si conclude che la scelta più economica per i semiconduttori è l'utilizzo di un solo diodo di grossa portata nello schema a presa centrale, che corrisponde alla soluzione con meno componenti.

Analizziamo a questo punto i costi di funzionamento delle due soluzioni valutando economicamente le perdite.

Oltre al costo fisso dei diodi si vogliono capitalizzare le perdite tramite le relazioni, utilizziamo l'espressione della caduta di tensione:

$$V_F = 1 + 0,3 \frac{i_{diodo}}{i_{FAV}}$$

e quindi le perdite per conduzione risultano essere:

$$P_{diodo} = V_F \cdot i_{diodo} = \left( 1 + 0,3 \frac{i_{diodo}}{i_{FAV}} \right) \cdot i_{diodo}$$

Sostituendo i valori e immaginando il costo di 300£c per ogni W (suggerito dal testo dell'esercitazione) si ha:

| Portata diodi [A] | Comp. in parallelo | Corrente diodo [A] | Potenza per diodo [W] | PRESA CENTRALE |                    |             | PONTE INTERO |                    |             |
|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------|--------------|--------------------|-------------|
|                   |                    |                    |                       | N° Diodi       | Potenza totale [W] | Costo [k£c] | N° Diodi     | Potenza totale [W] | Costo [k£c] |
| 25                | 3                  | 21,7               | 27,35                 | 6              | 164                | 49,2        | 12           | 328,2              | 98,5        |
| 50                | 2                  | 32,5               | 38,8                  | 4              | 155                | 46,5        | 8            | 310,4              | 93,1        |
| 100               | 1                  | 65                 | 67,7                  | 2              | 155,3              | 46,5        | 4            | 310,7              | 93,2        |

Ora si hanno i costi di tutte le varie parti, si riassume che:

$$\text{Costo}_{\text{Tot. Diodi}} + \text{Costo}_{\text{Perdite Capitalizzate}} = \text{Costo}_{\text{Tot. Semiconduttori}}$$

|                   |                   | PRESA CENTRALE           |                                           |                                   | PONTE INTERO             |                                           |                                |
|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| Portata diodi [A] | Portata diodi [A] | Costo totale diodi [k€c] | Costo capitalizz. Perdite semicond. [k€c] | Costo totale semiconduttori [k€c] | Costo totale diodi [k€c] | Costo capitalizz. Perdite semicond. [k€c] | Costo tot Semiconduttori [k€c] |
| 25                | 25                | 219                      | 49,2                                      | <b>268</b>                        | 294                      | 98,5                                      | <b>392,5</b>                   |
| 50                | 50                | 176                      | 46,5                                      | <b>222,5</b>                      | 256                      | 93,1                                      | <b>349,1</b>                   |
| 100               | 100               | 118                      | 46,5                                      | <b>164,5</b>                      | 188                      | 93,2                                      | <b>281,2</b>                   |

Il costo dei trasformatori invece li si ottiene come da direttiva del tesoro come:

$$\text{Costo}_{\text{Trat}} = 20 A_n$$

|                   |                              | PRESA CENTRALE                    |                    |                              | PONTE INTERO                   |                    |  |
|-------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------|--|
| Portata diodi [A] | Costo totale trasform. [k€c] | Costo totale semiconduttori [k€c] | Costo totale [k€c] | Costo totale trasform. [k€c] | Costo tot Semiconduttori [k€c] | Costo totale [k€c] |  |
| 25                | 609,7                        | 268                               | <b>877,8</b>       | 609,7                        | 392,5                          | <b>897,5</b>       |  |
| 50                | 609,7                        | 222,5                             | <b>832,3</b>       | 609,7                        | 349,1                          | <b>854,2</b>       |  |
| 100               | 609,7                        | 164,5                             | <b>774,2</b>       | 609,7                        | 281,2                          | <b>786,2</b>       |  |

Si conclude che le due soluzioni sono praticamente uguali viste le contenute variazioni di prezzo; la scelta di uno schema rispetto all'altro sarà quindi basata sul fatto d'avere o meno un determinato tipo di trasformatore o valutando fattori che qui sono stati trascurati, quali possono essere l'ingombro, e i costi di realizzazione.

Si passa ora ad analizzare le perdite totali ed il rendimento di entrambi gli schemi mediante la formula:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{persa}}$$

### Presa centrale

| Portata diodi [A] | Perdite trasfor. [W] | Perdite semicond. [W] | Perdite totali [W] | Rendimento   |
|-------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|--------------|
| 25                | 871                  | 164                   | 1'035              | <b>0,924</b> |
| 50                | 871                  | 155,3                 | 1'026              | <b>0,926</b> |
| 100               | 871                  | 155,3                 | 1'026              | <b>0,927</b> |

### Ponte intero

| Portata diodi [A] | Perdite trasfor. [W] | Perdite semicond. [W] | Perdite totali [W] | Rendimento   |
|-------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|--------------|
| 25                | 721                  | 328,2                 | 1'050              | <b>0,925</b> |
| 50                | 721                  | 310,7                 | 1'032              | <b>0,926</b> |
| 100               | 721                  | 311                   | 1'032              | <b>0,927</b> |

Anche dal punto di vista energetico si arriva a concludere che i due sistemi sono equivalenti, quindi la scelta deve effettuarsi su altri fattori qui trascurati come il valutare la componentistica e le caratteristiche dei diodi stessi atti a garantire una protezione circuitale contro picchi energetici che investono il raddrizzatore e i corrispettivi costi.

Durante questo dimensionamento sono stati usati componenti con caratteristiche rispondenti a quanto strettamente necessario, generalmente si preferisce sovradimensionare i componenti per evitare guasti e garantire una maggiore continuità di servizio; in particolare bisogna prestare attenzione alla tensione di break-down e scegliere componenti che oltre alla normale tensione di funzionamento sopportino eventuali picchi sulla linea di alimentazione, questa scelta è anche giustificata dal fatto di non comportare un eccessivo aumento di prezzo dei semiconduttori visto il basso rapporto che lega tensione di break-down al costo.

Proprio al fine di proteggere il raddrizzatore dalle sovratensioni originate da molteplici fattori esterni si può prendere in considerazione l'ipotesi di adottare sistemi dotati di capacità atte a limitare/neutralizzare sul semiconduttore da tale rischio.