



Powermos

ANALISI E PROGETTO DI ALIMENTATORI SENZA TRASFORMATORE (TRANSFORMERLESS)

3 January 2010

Introduzione

Scopo del presente **tutorial** è quello di illustrare una possibile tecnica di calcolo per alimentatori lineari senza trasformatore di isolamento (**transformerless power supply**).

Questo tipo di alimentatori hanno la caratteristica di sfruttare la **reattanza capacitiva** di un condensatore per ridurre la tensione di rete ai livelli desiderati senza dissipazione di potenza. Se da un lato si ottiene un costo complessivo estremamente contenuto dall'altro si perde una caratteristica molto importante, specialmente dal punto di vista della sicurezza, data dall'isolamento elettrico rispetto alla rete. Altro punto importante è dato dalla massima corrente erogabile da questa classe di alimentatori, benché da un punto di vista teorico si possano ottenere correnti anche dell'ordine degli ampere nella pratica questo non viene mai fatto dato che occorrerebbero condensatori con caratteristiche molto particolari, ingombranti, nonché costosi, in questo caso ci si orienta sui classici alimentatori lineari (dissipativi) oppure su quelli a commutazione (switching) in base al tipo di applicazione.

Al termine dell'esposizione verranno forniti dei riferimenti bibliografici a pubblicazioni internazionali ed application notes che il lettore interessato potrà consultare per approfondire l'argomento.

Poichè si lavora in presenza della tensione di rete manovre incaute eseguite da personale inesperto possono risultare fatali, se non si è perfettamente sicuri di ciò che si sta facendo è preferibile limitare lo studio di questa classe di alimentatori alla sola parte teorica senza procedere con la realizzazione pratica.

Si ricorda anche che l'uso di questa classe di alimentatori per impieghi industriali

richiede tassativamente il soddisfacimento di normative internazionali armonizzate relative alla sicurezza (isolamento elettrico) e sulla compatibilità elettromagnetica.

Analisi teorica

Lo schema di riferimento per l'analisi (non quello usato realmente in pratica illustrato al termine di questo documento) è presentato nella figura 1.

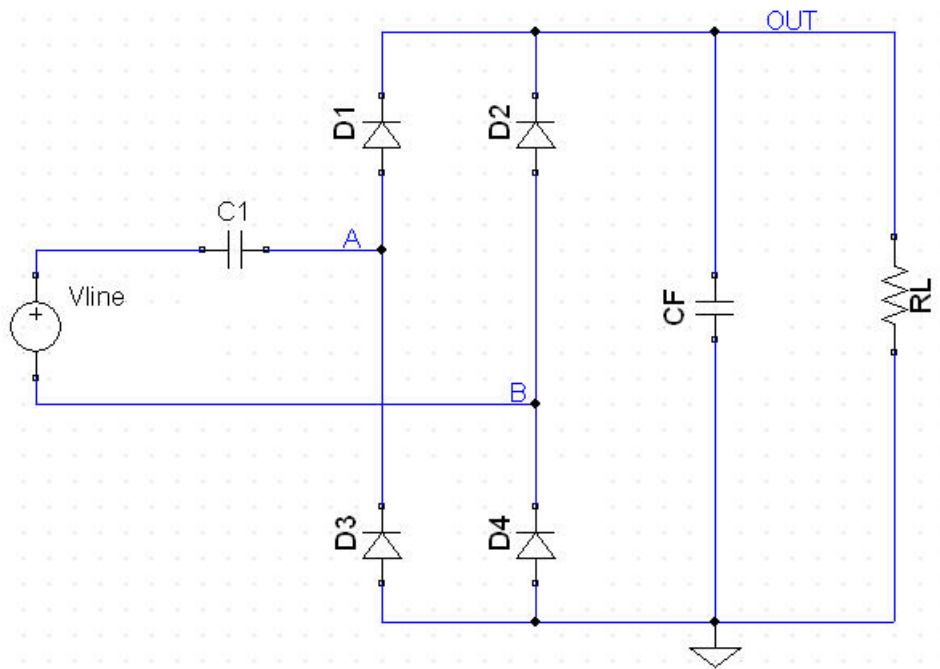


Figura 1 Schema elettrico per l'analisi teorica

Come anticipato nell'introduzione la tensione di rete viene ridotta a livelli compatibili con la specifica relativa alla tensione di uscita mediante la reattanza capacitiva del condensatore $C1$, la tensione a valle di questo condensatore viene poi raddrizzata utilizzando una soluzione a singolo diodo oppure con un ponte di diodi, il tutto viene poi completato inserendo il classico condensatore di filtro in uscita, la resistenza R_L posta in parallelo al condensatore di filtro rappresenta il carico dell'alimentatore.

Poichè nella realtà quello che si desidera ottenere in uscita all'alimentatore è una tensione di uscita stabilizzata o almeno sostanzialmente costante, in cascata al condensatore di filtro si potrà avere un elemento stabilizzatore come ad esempio un

diodo zener o un regolatore a tre terminali nel caso in cui la specifica sulla tensione di uscita risulti più stringente.

Oltre che essere utilizzato come alimentatore a bassa potenza questo circuito può anche essere impiegato come caricabatterie se al posto del condensatore di filtro C_F e del carico R_L si applica direttamente la batteria da ricaricare (prevedendo anche un sistema di controllo relativo alla situazione di batteria carica).

Per analizzare il funzionamento del circuito si possono fare le seguenti ipotesi semplificative, praticamente sempre rispettate nella pratica:

- si considera trascurabile il valore della tensione di uscita rispetto al valore di picco della tensione di rete;
- si trascura il ripple della tensione di uscita rispetto al valore medio della tensione stessa, questa ipotesi corrisponde a sostituire il gruppo RC di uscita con un generatore di tensione avente valore pari al valore medio della tensione di uscita (small ripple approximation).
- si considera il circuito a regime.

Nelle ipotesi di cui sopra è possibile semplificare ulteriormente lo schema di figura 1 come segue:

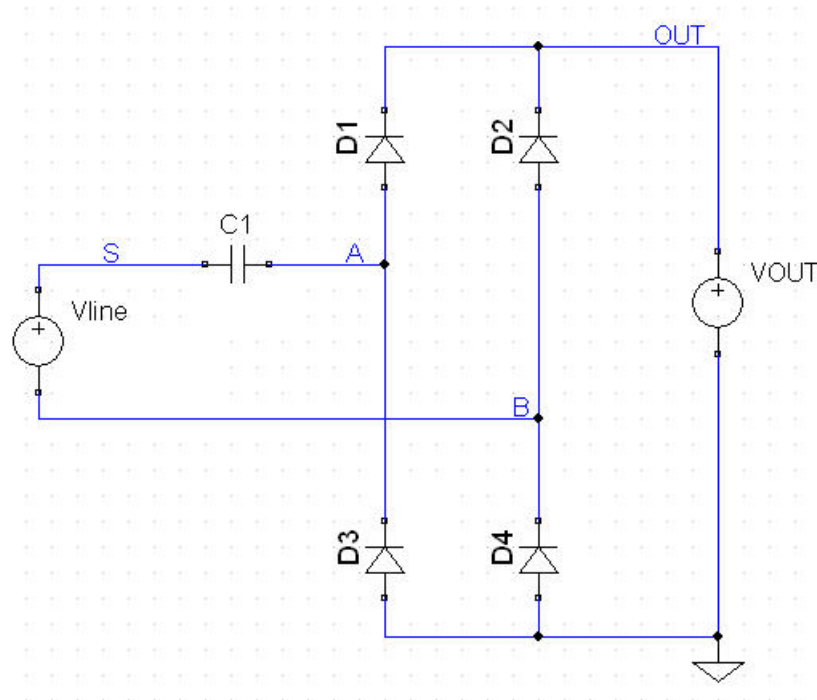


Figura 2 Circuito semplificato (si assume pari a zero il ripple della tensione di uscita)

Durante il funzionamento del circuito la tensione presente ai capi del condensatore di ingresso C_1 vale la differenza fra la tensione di rete V_{line} e la tensione presente ai capi del ponte di diodi V_{AB} . Avendo un generatore di tensione in continua posto sull'uscita del ponte i diodi entreranno in conduzione solo quando la tensione in ingresso supera un valore dato dalla tensione di uscita sommata alla tensione di soglia dei diodi usati per la realizzazione del ponte stesso.

Questa osservazione consente di suddividere il funzionamento del circuito in una serie di fasi di funzionamento differenti e ben distinte ognuna delle quali relativa ad una struttura topologica da analizzare ben definita.

Anche se il circuito risulta apparentemente semplice dato l'esiguo numero di componenti da cui è composto in realtà l'analisi dettagliata non è immediata come si vedrà nel seguito della trattazione. Iniziamo con l'analizzare il funzionamento a regime del circuito riportato nella figura 2 esaminando le forme d'onda più significative ottenute attraverso l'ausilio della simulazione numerica.

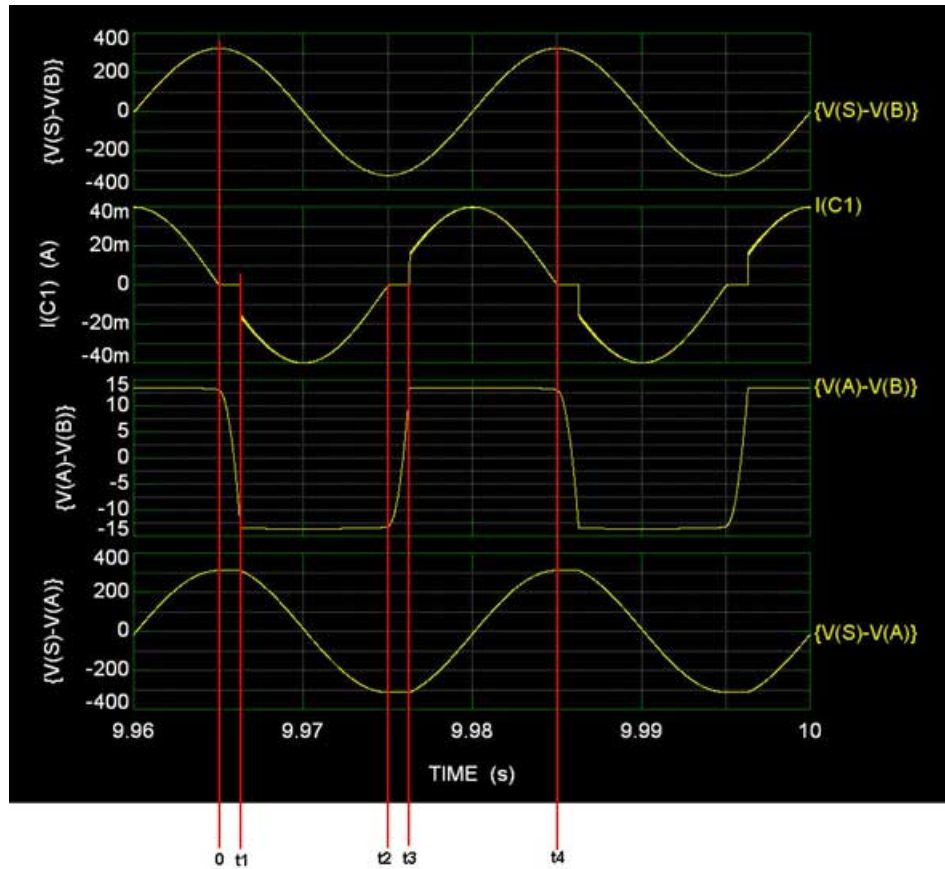


Fig. 3 Simulazione numerica del circuito di figura 2 ($V_o=12$ V).

Iniziamo l'analisi del sistema a regime partendo dall'istante di tempo $t=0$, in questa situazione la tensione di rete assume il valore massimo quindi avrà derivata pari a zero, poichè la corrente attraverso il condensatore di ingresso si esprime come derivata della tensione ai suoi capi e questa tensione è da un lato pari alla tensione di rete mentre dall'altro coincide con la tensione di uscita sommata alla caduta dei diodi del ponte, la corrente dovrà essere necessariamente pari a zero (la derivata di una costante è pari a zero) in corrispondenza dell'istante di tempo t_1 .

Poichè non si ha passaggio di corrente attraverso C_1 i diodi del ponte si interdicono rimanendo nello stato di non conduzione fino a quando la tensione V_{AB} ai capi del ponte non raggiunge un valore di tensione negativo uguale alla somma della tensione di uscita con la tensione di soglia dei diodi stessi. Fino a questo istante di tempo la tensione ai capi del condensatore di ingresso rimane costante. L'accensione dei diodi del ponte è brusca (hard turn-on) ed è quindi soggetta a dissipazione di potenza per commutazione.

Superato t_1 i diodi del ponte rimangono in conduzione fino a quando la corrente non si annulla naturalmente in corrispondenza dell'istante di tempo t_2 . Si nota subito come lo spegnimento dei diodi in questo caso sia dolce (soft turn-off) dato che si ha una commutazione a corrente nulla (ZCS ovvero Zero Current Switching).

Poichè la corrente è nuovamente nulla la tensione ai capi del condensatore di ingresso C_1 rimane costante mentre la tensione presente ai capi del ponte di diodi riprende a seguire l'andamento della tensione di rete fino a quando la tensione V_{AB} non raggiunge il valore della tensione di uscita sommata alla tensione di soglia dei diodi, a questo punto siamo in corrispondenza dell'istante di tempo t_3 .

Da questo punto in avanti i diodi del ponte entrano nuovamente in conduzione (accensione brusca) consentendo nuovamente la circolazione di corrente attraverso il condensatore di ingresso ed il ciclo si completa quando la corrente, con andamento sinusoidale, si annulla in corrispondenza dell'istante di tempo t_4 (spegnimento dolce).

A questo punto l'intero ciclo di funzionamento si ripete dall'inizio.

Studio analitico semplificato e derivazione delle equazioni di progetto

Una volta compreso il funzionamento del circuito è possibile determinare le relazioni di progetto che consentono di calcolare il valore della tensione di uscita in funzione della capacità di ingresso C_1 . Volendo fare un'analisi rigorosa si dovrebbero scrivere le equazioni relative all'andamento della tensione e della corrente per ogni singola fase di funzionamento del circuito, questo procedimento, anche se non complicato, risulta comunque dispendioso in termini di tempo, ed è interamente riportato nella pubblicazione [1] che ho trovato solo dopo che avevo completato questo tutorial, mi limito pertanto ad esporre la mia analisi originale che, seppur semplificata, consente comunque di dimensionare in modo sufficientemente accurato il circuito di figura 1.

L'analisi che presenterò nel seguito si basa su una assunzione molto semplice praticamente sempre verificata nella pratica ovvero che la tensione di uscita sia trascurabile rispetto alla tensione massima di linea. Da un punto di vista pratico possiamo dire che questa ipotesi risulta sufficientemente accurata nel caso di tensioni di uscita inferiori a circa 30 V, per valori di tensione maggiore, come si vedrà in seguito, si hanno dei problemi legati al valore del condensatore.

Nell'ipotesi di cui sopra la corrente attraverso il condensatore di ingresso vale:

$$I_{PK} = \omega C_1 V_{PK} \quad (1)$$

la corrente che attraversa il carico vale:

$$I_O = \frac{V_O}{R} \quad (2)$$

La corrente media che attraversa il condensatore di uscita deve necessariamente coincidere con la corrente media che attraversa il carico (si sfrutta l'ipotesi di funzionamento a regime, in tal caso la corrente media del condensatore di filtro deve essere necessariamente nulla, in caso contrario si avrebbe un incremento oppure una diminuzione della tensione media ai capi del condensatore di uscita contravvenendo all'ipotesi di funzionamento a regime), si può quindi scrivere:

$$\frac{V_O}{R} = \frac{2}{\pi} \omega C_1 V_{PK} \quad (3)$$

Volendo evidenziare nella (3) il valore efficace della tensione di ingresso si potrà scrivere:

$$\frac{V_O}{R} = \frac{2}{\pi} \omega C_1 V_{PK} \rightarrow \frac{V_O}{R} = \frac{2}{\pi} \omega C_1 V_{IN} \sqrt{2} \quad (4)$$

A questo punto è facile ricavare dalla (4) l'espressione della tensione di uscita:

$$V_O = \frac{2}{\pi} \omega C_1 R V_{IN} \sqrt{2} = 4\sqrt{2} f C_1 R V_{IN} \quad (5)$$

ottenendo per la funzione di trasferimento $\frac{V_O}{V_{IN}}$ la seguente relazione:

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = 4\sqrt{2}fC_1R \quad (6)$$

La (6) illustra che la tensione massima in uscita risulta legata oltre che al valore del carico anche al valore della capacità posta in ingresso ed in particolare come il valore assunto da questo componente sia fondamentale per il calcolo della massima corrente erogabile dall'alimentatore stesso. Poichè il rapporto fra la tensione media in uscita ed il valore della resistenza di carico altro non è che la corrente media erogata in uscita dall'alimentatore la (6) si può riscrivere come segue:

$$I_O = (4\sqrt{2}fV_{IN}) C_1 \quad (7)$$

come regola pratica di progetto si può affermare che in presenza di tensione di rete a 230 V 50 Hz nominali la corrente erogabile in uscita aumenta di circa 65 mA per ogni microfarad della capacità di ingresso C_1 (questo valore lo si ricava sostituendo numericamente nella (7) assumendo C_1 pari ad 1 μ F).

La (7) consente anche di calcolare la corrente massima erogata dall'alimentatore nel caso di corto circuito all'uscita, in questa situazione la corrente non diverge, ma è sempre limitata al valore previsto dalla (7), in questo caso infatti l'unico carico visto dalla rete è dato dalla reattanza capacitiva del condensatore di ingresso. Questo è uno dei pochi vantaggi di questa classe di alimentatori, una protezione intrinseca contro il corto circuito in uscita.

Nel caso in cui l'alimentatore venga fatto funzionare a vuoto, ovvero senza carico in uscita, la tensione di uscita massima dopo un transitorio iniziale si porta ad un valore uguale al valore di picco della tensione di rete, questa è quindi una condizione che deve essere sempre evitata.

Progettare l'alimentatore significa anche dimensionare correttamente gli altri componenti che lo costituiscono quindi i diodi del ponte raddrizzatore ed il valore della capacità del condensatore di filtro in uscita (funzione del ripple massimo desiderato in uscita).

Dimensionamento dei diodi del ponte

Scegliere i diodi da usare per il ponte di diodi implica valutare la corrente media massima e di picco attraverso i diodi e la tensione inversa massima a cui i diodi sono sottoposti nel caso di polarizzazione inversa.

La tensione inversa massima si determina facilmente dall'analisi del funzionamento dell'alimentatore e coincide in prima approssimazione con il valore della tensione di uscita (tensione media sommata al ripple), volendo essere conservativi si è detto che nel caso di funzionamento a vuoto la tensione di uscita coincide con il valore di picco della tensione di rete pertanto si sceglieranno dei diodi con tensione inversa di almeno 400 V, un possibile esempio di diodo commerciale utilizzabile allo scopo è dato dal modello 1N4004 (scarica il datasheet).

Ovviamente prima di poter scegliere definitivamente il dispositivo si devono verificare i livelli di corrente media e di picco. La corrente media coincide con la corrente media attraverso il condensatore di ingresso ed è calcolabile attraverso la relazione (7). La corrente di picco si determina facilmente considerando l'andamento della corrente attraverso il condensatore di ingresso; nelle ipotesi in cui si possa trascurare il valore medio della tensione di uscita rispetto alla tensione di rete massima la corrente avrà andamento sinusoidale con valore di picco dato dalla relazione (1).

Ricapitolando il dimensionamento dei diodi del ponte si può fare come segue:

- tensione inversa massima pari al valore di picco della tensione di rete massima;
- corrente media calcolata con la (7)
- corrente di picco calcolata con la (1)

Dimensionamento del condensatore di filtro in uscita

Il valore del condensatore di filtro in uscita è legato all'ondulazione di tensione massima in uscita, indicata nel seguito con il termine ripple, che si è disposti ad accettare. Il calcolo dell'ondulazione massima può essere fatto in modo abbastanza veloce facendo un'ipotesi abbastanza ragionevole e ben verificata nella pratica in cui si suppone che l'ampiezza picco-picco del ripple sia sempre molto inferiore al valore medio della tensione a cui il ripple è riferito (ipotesi small ripple approximation).

Nell'ipotesi di cui sopra la corrente che attraversa il carico dell'alimentatore (identificabile con la resistenza R_L nello schema di figura 1) si può ipotizzare costante, seguendo questa assunzione allora la corrente che attraversa il condensatore di filtro sarà data dalla corrente in uscita al ponte di diodi (avente andamento pari al modulo del seno) diminuita della corrente di uscita (che in breve viene a coincidere con il valore medio della corrente in uscita al ponte di diodi stesso dato che questa componente continua, per l'ipotesi di funzionamento a regime, viene assorbita interamente dal carico R_L).

E' altresì ovvio che questa sia solo un approssimazione dato che l'effetto della corrente attraverso il condensatore produce automaticamente una variazione di tensione ai suoi capi e quindi una variazione di corrente nella resistenza di uscita, ma se si accetta il fatto che tale variazione di corrente in uscita possa essere trascurata rispetto al valore medio della corrente stessa allora l'ipotesi di cui sopra fornisce dei risultati praticamente accettabili e semplifica notevolmente il processo analitico di studio del problema.

Fatta questa premessa, doverosa per poter comprendere nell'intimo il processo di calcolo utilizzato, si inizia con l'analizzare il nodo di uscita dell'alimentatore:

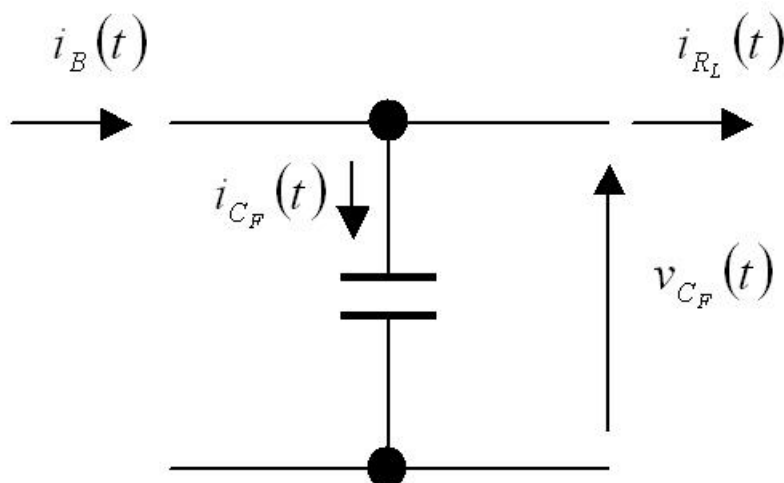


Figura 4 Analisi delle correnti al nodo di uscita dell'alimentatore.

Dovendo analizzare l'andamento della tensione presente ai capi del condensatore di uscita si parte dall'equazione costitutiva della capacità:

$$i_{C_F}(t) = C_F \frac{dv_{C_F}(t)}{dt} \quad (8)$$

l'espressione della tensione la si ricava integrando la corrente attraverso il condensatore:

$$v_{C_F}(t) = \frac{1}{C_F} \int_{t_0}^t i_{C_F}(t) dt \quad (9)$$

La corrente che attraversa il condensatore si ricava per ispezione scrivendo la legge di Kirchhoff delle correnti applicata al nodo di uscita dell'alimentatore ottenendo:

$$i_B(t) - i_{C_F}(t) - i_{R_L}(t) = 0 \quad (10)$$

ottenendo infine:

$$i_{C_F}(t) = i_B(t) - i_{R_L}(t) \cong i_B(t) - I_O \quad (11)$$

in cui si è sfruttata l'ipotesi di small ripple approximation scrivendo che la corrente di uscita risulta sostanzialmente costante (infatti risulta l'unico termine scritto con caratteri maiuscoli, in tutti gli altri è presente la dipendenza dal tempo).

$$i_{C_F}(t) = |I_{PK} \sin(\omega t)| - I_O \quad (12)$$

poichè si ipotizza che il sistema funzioni a regime il valore della corrente media attraverso il condensatore di filtro dovrà essere necessariamente zero il che significa che la corrente di uscita dovrà necessariamente essere uguale al valore medio della corrente uscente dal ponte di diodi ovvero:

$$I_O = \frac{2}{\pi} I_{PKC_1}$$

ottenendo per la (12):

$$i_{C_F}(t) = I_{PKC_1} \left(|\sin(\omega t)| - \frac{2}{\pi} \right)$$

Sostituendo nella (9) è possibile scrivere l'equazione che esprime l'andamento della componente alternativa (ripple) a regime della tensione di uscita:

$$v_{C_F}(t) = \frac{I_{PKC_1}}{C_F} \int \left(|\sin(\omega t)| - \frac{2}{\pi} \right) dt \quad (13)$$

il ripple picco-picco si ottiene dalla (13) valutando l'integrale fra i due istanti di tempo relativi alla tensione massima (t_1) ed a quella minima (t_2):

$$\Delta V_{C_F} = \frac{I_{PKC_1}}{C_F} \int_{t_2}^{t_1} \left(|\sin(\omega t)| - \frac{2}{\pi} \right) dt \quad (14)$$

A questo punto è di fondamentale importanza ricavare i due istanti di tempo dato che questi consentiranno di valutare in forma chiusa l'integrale presente nella (14) ottenendo in questo modo l'ondulazione di tensione picco-picco sul condensatore di uscita. L'individuazione di questi due punti si può effettuare facilmente considerando l'andamento della corrente attraverso il condensatore stesso e disegnando l'andamento della tensione corrispondente associata alla caduta capacitiva del condensatore.

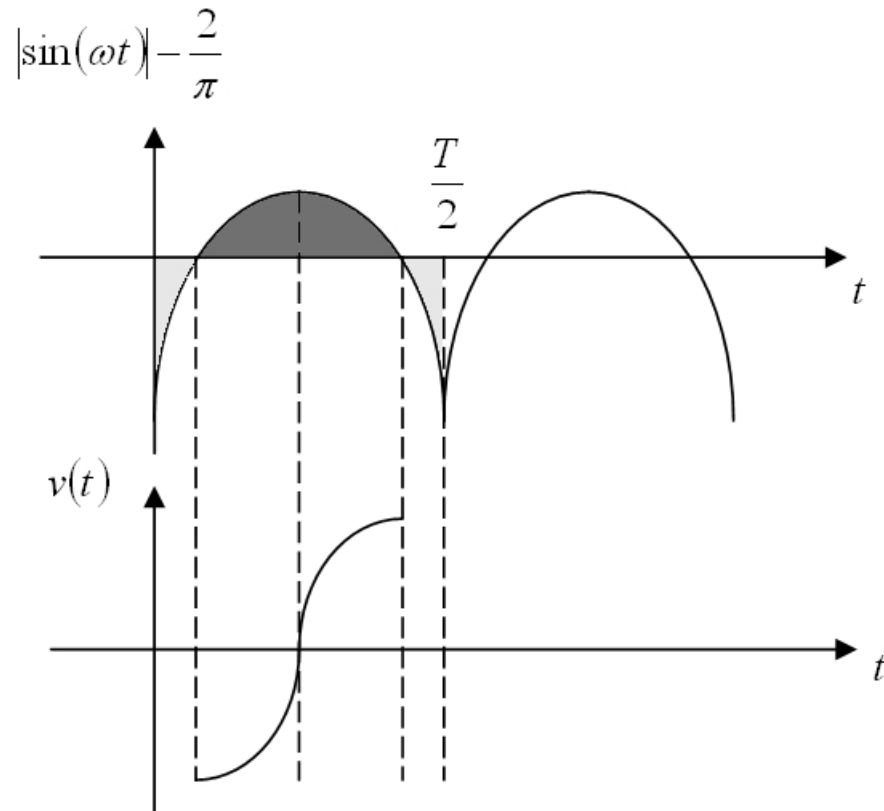


Fig. 5

Fig. 5 Andamento della corrente e della tensione relativi al condensatore di filtro C_F .

Dall'analisi della figura 5 è semplice constatare come i due intervalli di tempo siano quelli che soddisfano la seguente equazione trigonometrica:

$$\sin(\omega t) - \frac{2}{\pi} = 0$$

ottenendo due soluzioni distinte (a causa della molteplicità della funzione seno):

$$\omega t_1 = \arcsin\left(\frac{2}{\pi}\right)$$

$$\omega t_2 = \pi - \arcsin\left(\frac{2}{\pi}\right)$$

Sostituendo i due estremi di integrazione nella (14) e risolvendo l'integrale definito si perviene al seguente risultato finale:

$$\begin{aligned}
 \Delta V_{C_{FPP}} &= \frac{I_{PK}C_1}{C_F} \cdot \left\{ -\frac{1}{\omega} \cos(\omega t) \Big|_{t_1}^{t_2} - \frac{2}{\pi} (t_2 - t_1) \right\} = \\
 &= \frac{I_{PK}C_1}{\omega C_F} \cdot \left\{ -\cos(\omega t) \Big|_{t_1}^{t_2} - \frac{2}{\pi} (\omega t_2 - \omega t_1) \right\} = \\
 &= \frac{I_{PK}C_1}{\omega C_F} \cdot \left[\cos(\omega t_1) - \cos(\omega t_2) - \frac{2}{\pi} (\omega t_2 - \omega t_1) \right] = \\
 &= \frac{\omega C_1 V_{PK}}{\omega C_F} \cdot \left[2 \cos(\omega t_1) - \frac{2}{\pi} \left(\pi - 2 \arcsin\left(\frac{2}{\pi}\right) \right) \right] = \\
 &= \frac{2V_{PK}C_1}{C_F} \cdot \underbrace{\left[\cos(\omega t_1) - 1 + \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{2}{\pi}\right) \right]}_{0.21}
 \end{aligned}$$

Mettendo in evidenza il valore efficace della tensione di rete è possibile scrivere la seguente relazione di progetto:

$$\Delta V_{C_{FPP}} = 0.594 \cdot V_{IN} \cdot \frac{C_1}{C_F} \quad (15)$$

Facendo riferimento allo schema riportato nello schema di figura 1 ed in presenza di tensione di alimentazione pari a 230 V @ f=50 Hz assumendo $C_1=390$ nF, $C_2=220$ μ F, si ottiene una ondulazione (ripple) picco-picco pari a 242 mV, la simulazione fornisce un valore uguale a circa 270 mV.

Un'ulteriore considerazione in merito al risultato ottenuto con la (15) è dato dal fatto che questa relazione non considera il valore del carico, questo ovviamente discende dal fatto che si è ipotizzato di trascurare l'effetto della tensione di uscita sul calcolo della corrente attraverso il condensatore di ingresso, in realtà si ha una certa dipendenza che però agli effetti pratici del calcolo del ripple non è determinante.

Come verifica sono state effettuate simulazioni con variazioni del carico in un intervallo di 100 volte (da 100 ohm a 10 kohm) con due valori distinti per il

condensatore di ingresso $C_1=390$ nF e $C_1=1$ μ F il valore della capacità di filtro risulta sempre pari a 220 μ F. Di seguito si riportano le misure ricavate mediante l'ausilio della simulazione numerica confrontandole con quelle ricavate dal calcolo teorico (in ogni casella è riportato nella sezione di sinistra il valore ricavato dalla simulazione numerica mentre a destra il valore ricavato utilizzando le relazioni ricavate nelle sezioni precedenti).

R_L (Ω)	I_{C1} picco (mA)	V_o media (V)	V_o ripple pp (mV)
100	39.84 / 39.85	2.51 / 2.54	249 / 242
470	39.90 / 39.85	11.46 / 11.92	268 / 242
1000	39.92 / 39.85	23.46 / 25.37	293 / 242
10000	40.45 / 39.85	142 / 253.71	335 / 242

Tabella 1. Capacità di ingresso 390 nF

R_L (Ω)	I_{C1} picco (mA)	V_o media (V)	V_o ripple pp (mV)
100	102 / 102	6.34 / 6.5	658 / 621
470	102 / 102	27.8 / 30.6	775 / 621
1000	102 / 102	54 / 65.05	872 / 621
10000	102 / 102	215 / 650	628 / 621

Tabella 2. Capacità di ingresso 1 μ F.

I valori evidenziati in rosso sono caratterizzati da un errore nella stima della tensione di uscita media superiore al 20 % rispetto al valore ottenuto con la simulazione numerica, questo a causa del fatto che la corrente attraverso il condensatore di ingresso non è più approssimabile con una forma d'onda sinusoidale, questo fatto discende dalla violazione dell'ipotesi iniziale che stabiliva di poter trascurare il valore della tensione di uscita rispetto al valore della tensione massima di ingresso.

Da quanto ottenuto ne discende che l'uso delle formule ricavate con il metodo proposto risulta praticamente valido solo per tensioni non superiori a circa 50 V, valore che nella pratica risulta abbondantemente superiore a quelli normalmente usati per la realizzazione di questa classe di alimentatori che, solitamente, prevede tensioni di uscita inferiori a 19 V. Nel caso in cui si vogliono realizzare alimentatori con tensione di uscita superiore è consigliabile ricorrere all'analisi rigorosa suffragata dalla simulazione numerica, oppure utilizzare un sistema tradizionale con isolamento a trasformatore.

Esempio di dimensionamento di un alimentatore

Supponiamo di dover progettare un alimentatore senza trasformatore con le seguenti caratteristiche:

- tensione di uscita media 12 V;
- ripple massimo in uscita 1 V (picco-picco);
- corrente di uscita massima 50 mA;
- tensione di rete 230 V \pm 10% 50 Hz;

Ipotizziamo di voler realizzare la regolazione della tensione di uscita usando un diodo zener; in base alla specifica relativa alla tensione di uscita ci si orienterà su un diodo con tensione di zener pari a 12 V.

Poichè la corrente massima deve essere di 50 mA si dovrà dimensionare in modo opportuno il condensatore di ingresso al fine di poter avere in ogni condizione di lavoro una corrente media in uscita dal ponte di diodi pari ai 50 mA richiesti in uscita più una quota associata al fatto che il diodo zener deve poter lavorare nella zona di breakdown. Oltre a questa considerazione si deve anche considerare il fatto che il carico potrà essere spento ovvero non consumare corrente, in tal caso tutta la corrente erogata dal ponte dovrà essere assorbita dallo zener che, per tale motivo, dovrà essere dimensionato correttamente specialmente nei confronti della potenza massima dissipabile.

Nel caso in cui sia lo zener a farsi carico di tutta la corrente del ponte la potenza dissipata sarà sicuramente non inferiore a 0.6 W (si deve infatti vedere quale sarà il valore della corrente di zener per il componente in esame). Per stare dalla parte della ragione si potrà iniziare la ricerca considerando zener da 12 V e 1 W di potenza massima dissipabile.

Volendo una soluzione a singolo diodo zener si può iniziare a prendere in considerazione il modello DFLZ12 (scarica datasheet) prodotto dalla Diodes Incorporated (<http://www.diodes.com/>). Analizzando il datasheet la corrente di breakdown (IZT) vale 50 mA il che porta a dover considerare una corrente media in uscita dal ponte pari ad almeno 100 mA, con questo parametro è possibile determinare il valore di capacità del condensatore C_1 (in questo caso la potenza massima che lo zener dovrà essere in grado di dissipare in modo continuativo risulta uguale a circa 1.2 W, un po' troppo giusta per il componente scelto, una possibile

soluzione potrebbe essere la realizzazione dello stadio di regolazione usando la struttura zener-transistore in cui il diodo zener avendo una potenza inferiore sarà caratterizzato da una IZT inferiore; in ogni caso si continua il dimensionamento di esempio giusto per illustrare il processo di calcolo). Dalla (7) è possibile scrivere:

$$C_{1\min} = \frac{I_{O\min}}{4\sqrt{2}fV_{IN}} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{4\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 207} = 1.7\mu F$$

in cui si è assunto il valore minimo previsto per la tensione di rete europea, il valore della capacità viene arrotondato per eccesso al valore commerciale più prossimo quindi 1.8 μF . Il valore della corrente di picco attraverso questo condensatore alla tensione di rete nominale vale:

$$\begin{aligned} I_{C1PK} &= \omega C_1 V_{PK} = 2\pi f C_1 \sqrt{2} V_{IN} = \\ &= 2\pi \cdot 50 \cdot 1.8 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2} \cdot 230 = \\ &= 184 \text{ mA} \end{aligned}$$

A questo punto si valuta la tensione di uscita utilizzando la relazione (6):

$$\begin{aligned} V_O &= 4\sqrt{2}fC_1V_{IN}R = 28.1V \\ R_{\min} &= \frac{V_O}{I_O} = \frac{12}{50 \cdot 10^{-3}} = 240\Omega \end{aligned}$$

Poichè la tensione in uscita al ponte risulta inferiore a 50 V si può considerare soddisfatta l'ipotesi iniziale utilizzata per ricavare le relazioni di progetto. Si valuta il valore della resistenza di limitazione della corrente per lo zener:

$$\begin{aligned} R_Z &= \frac{V_{OB} - V_Z}{I_{OB}} = \frac{28.1 - 12}{100 \cdot 10^{-3}} = 161\Omega \\ P_{DRZ} &= \frac{(28.1 - 12)^2}{161} = 1.61W \end{aligned}$$

Si potranno usare due resistori da 320 Ω 1W in parallelo fra loro.

Utilizzando la (15) si calcola il valore della capacità del condensatore di filtro da porre all'uscita del ponte di diodi:

$$C_F \geq 0.594 \cdot V_{IN_{MAX}} \cdot \frac{C_1}{\Delta V_{CFPP}}$$

sostituendo i valori numerici:

$$C_F \geq 0.594 \cdot 253 \cdot \frac{1.8 \cdot 10^{-6}}{1} = 270.5 \mu\text{F}$$

si potrà quindi adottare un condensatore di filtro avente una capacità di almeno 270 μF con una tensione di lavoro di almeno 50 V.

Lo schema completo dell'alimentatore appena progettato sarà quindi il seguente:

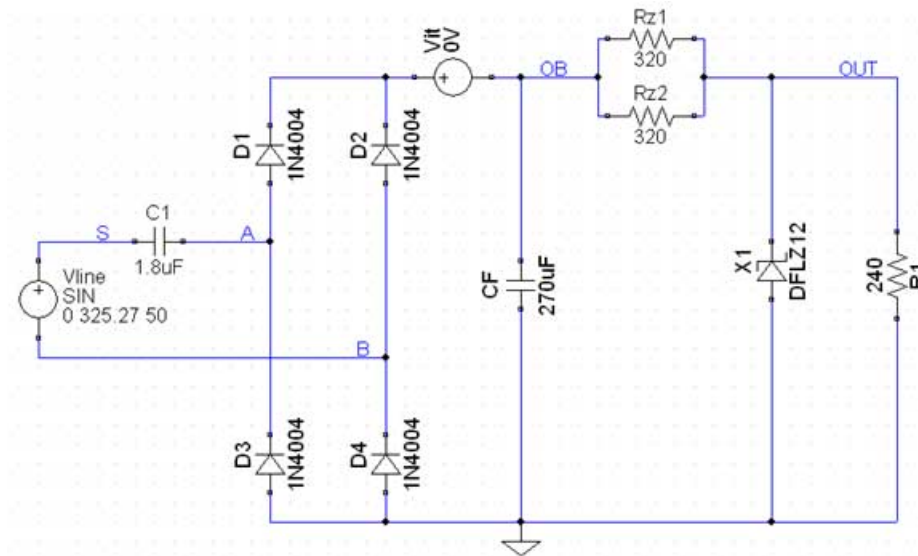


Fig. 6 Circuito alimentatore senza trasformatore con regolazione tramite diodo zener.

Per verificare il dimensionamento si riportano i risultati ottenuti dalla simulazione numerica (tensione di rete al valore nominale di 230 V e frequenza 50 Hz):

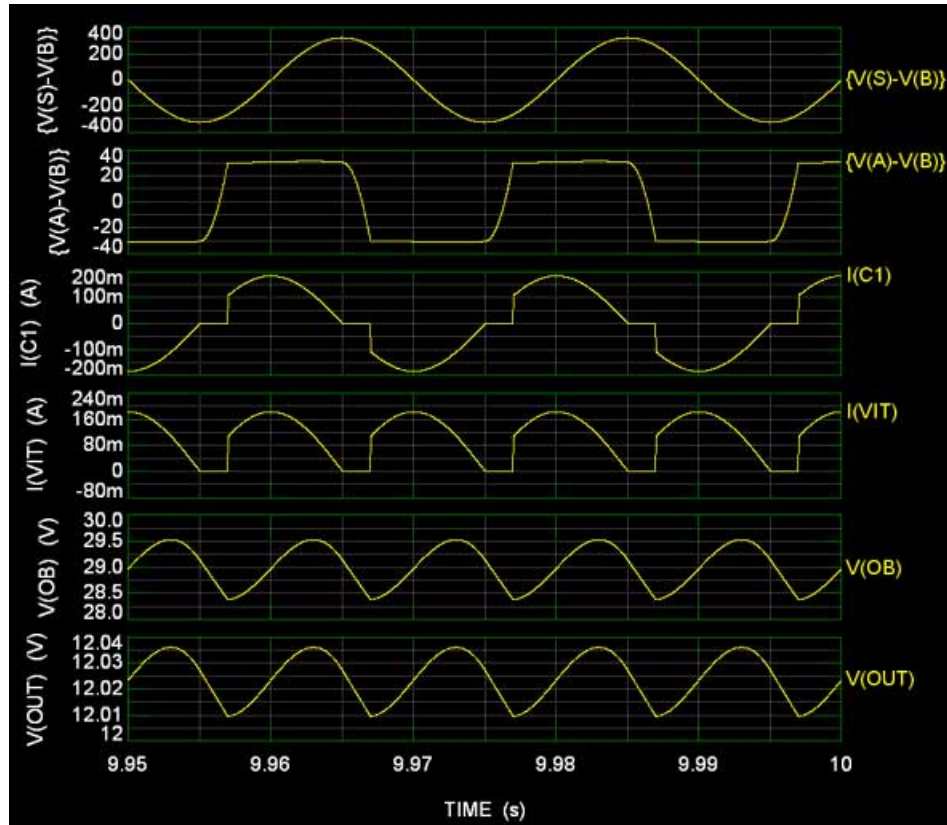


Fig. 7 Simulazione numerica dell'alimentatore di esempio

dai risultati ottenuti si può concludere che l'alimentatore soddisfa i requisiti di progetto e si conferma la validità dell'approccio analitico illustrato nel corso della presente esposizione.

RL (Ω)	I _{C1} picco (mA)	V _{OB} media (V)	V _{OB} ripple pp (mV)
240	183.8 / 184	29.01 / 28.1	1140 / 910

Tabella 3. Comparazione fra risultati simulazione numerica (a sinistra) e calcolo teorico (a destra).

Nel caso in cui la corrente assorbita in uscita fosse nulla (R_L di valore infinito) tutta la corrente viene assorbita dallo zener che si trova in questa condizione di lavoro a dover dissipare una potenza media pari a 1.29 W (valore ricavato dalla simulazione numerica).

Infine il circuito di regolazione con il gruppo resistenza-zener può ancora essere ulteriormente semplificato se si considera il fatto che l'alimentatore, visto dall'uscita del ponte di diodi, è in sostanza un generatore di corrente. Da questo punto di vista è quindi possibile eliminare il resistore posto a monte dello zener e mettere quest'ultimo direttamente in parallelo al condensatore di filtro C_F posto in uscita al ponte di diodi, rispetto al caso con la resistenza si risparmia un componente ottenendo un peggioramento del ripple di tensione in uscita (in questo caso pari a 677 mV contro i 30 mV circa del caso con la resistenza).

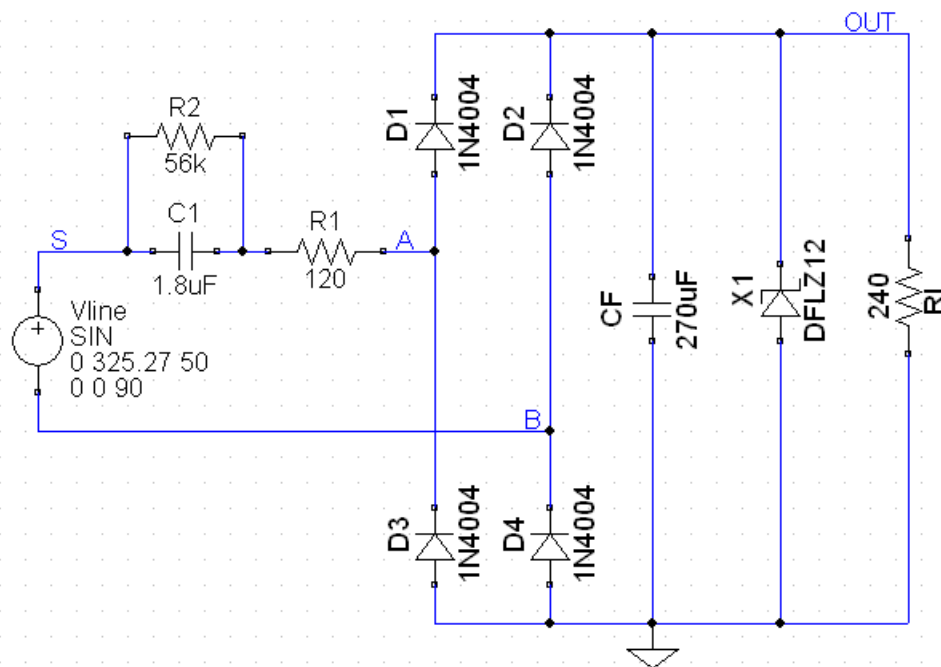


Fig. 8 Alimentatore con stabilizzazione della tensione di uscita a diodo zener.

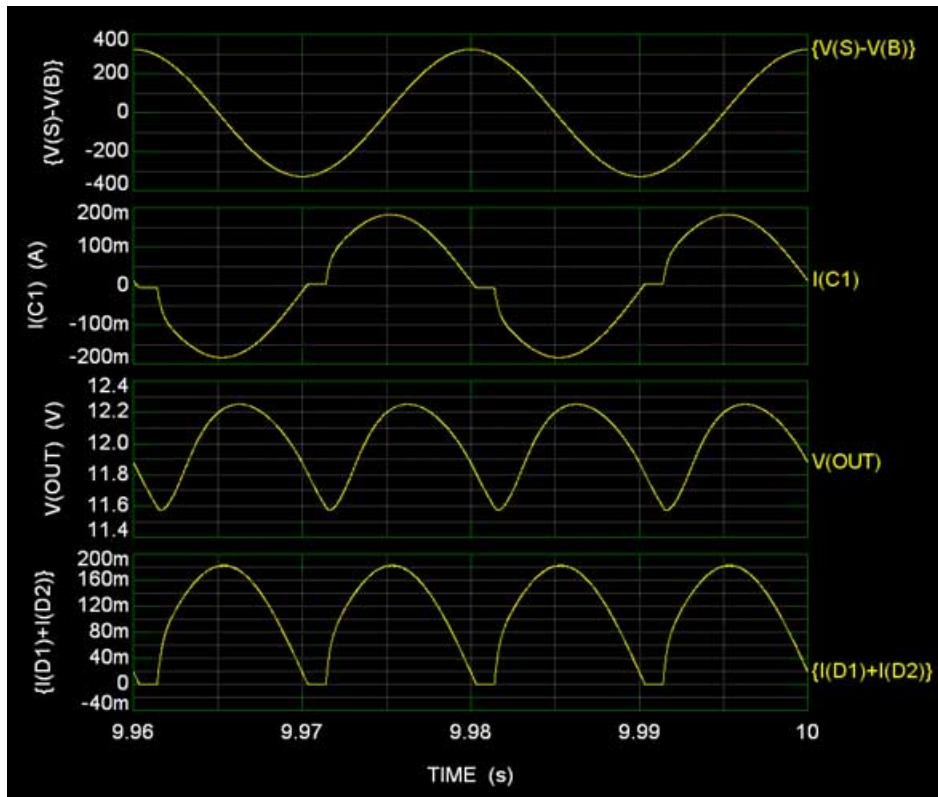
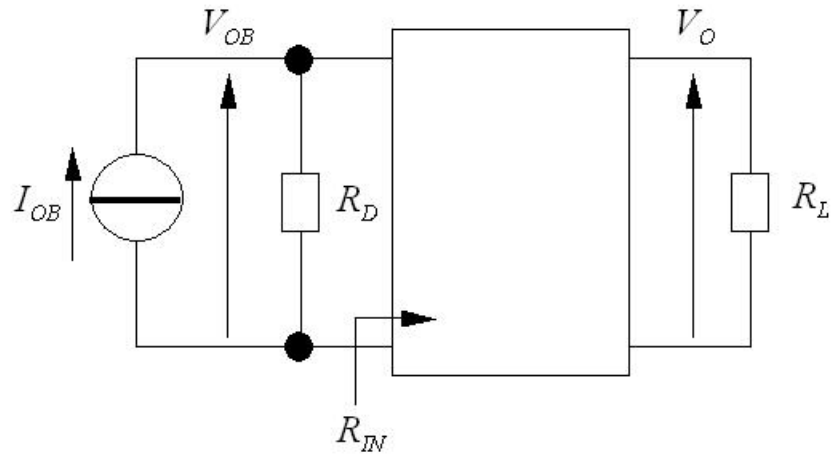


Fig. 9 Simulazioni numeriche relative allo schema di figura 8.

Gli esempi presentati sono solo alcune fra le varie possibilità realizzative di questa classe di alimentatori, a prescindere dal tipo di regolazione della tensione di uscita (tramite zener oppure attraverso l'uso di strutture integrate quali ad esempio i regolatori a tre terminali) è fondamentale avere sempre in mente il principio che sta alla base di questa classe di alimentatori e cioè che la sorgente usata per alimentare lo stadio di regolazione è assimilabile ad un generatore di corrente costante e non ad un generatore di tensione come accade invece nel caso degli alimentatori realizzati usando la classica struttura a trasformatore di isolamento con ponte e filtro di uscita.

Poichè il sistema è equivalente ad un generatore di corrente costante si dovrà porre particolare attenzione al valore dell'impedenza di ingresso dello stadio di regolazione dato che questa, unitamente alla corrente erogata in uscita al ponte di diodi, determina il livello della tensione presente in uscita al ponte stesso.

Per illustrare meglio il concetto si riportano di seguito due situazioni che riassumono ciò che si può trovare nella pratica corrente.

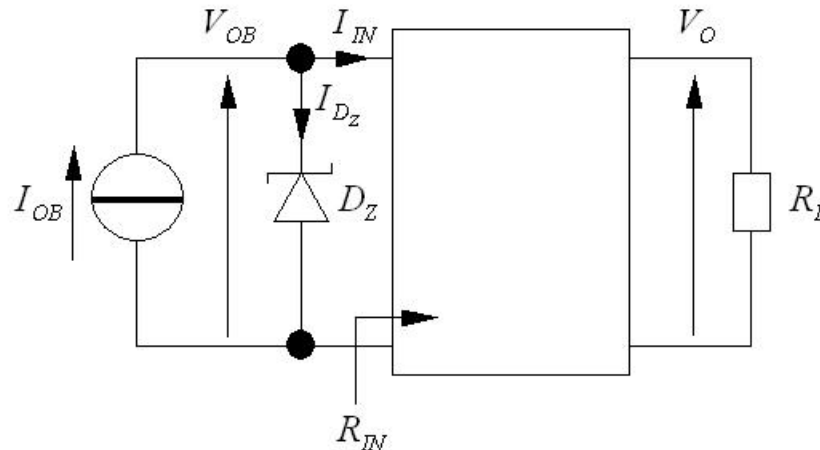


$$I_{OB} = 4\sqrt{2}fC_1V_{IN}$$

$$V_{OB} = I_{OB} \cdot \frac{R_D \cdot R_{IN}}{R_D + R_{IN}}; \quad R_{IN} = f(R_L)$$

Fig. 10 Allestimento 1 (limitazione tensione di ingresso usando un resistore R_D di valore apposito)

Nello schema di figura 10 l'uscita del ponte è caricata con un semplice resistore di valore R_D , l'impedenza complessiva vista dal ponte di diodi è quindi data dal parallelo fra questa resistenza e la resistenza di ingresso dello stadio di regolazione che, in generale, è una funzione del carico (R_L).



$$I_{OB} = 4\sqrt{2}fC_1V_{IN}$$

$$V_{OB} = I_{OB} \cdot R_{IN}; \quad I_{D_Z} < I_{ZT}$$

$$V_{OB} = V_Z; \quad I_{D_Z} \geq I_{ZT}$$

Figura11

Fig. 11 Allestimento 2 (limitazione tensione di ingresso tramite diodo zener D_Z).

Nello schema di figura 11 la tensione in uscita al ponte è limitata ad un valore di sicurezza impostato dal diodo zener D_Z (lo schema di esempio riportato nella figura 8 ricade in questa sottoclasse).

Considerazioni finali

Facendo riferimento allo schema di figura 6 è possibile apportare delle ulteriori modifiche in modo tale da ridurre l'assorbimento di corrente iniziale alla prima accensione del circuito per effetto del fatto che i condensatori presenti sono inizialmente scarichi (inrush current). Altro aspetto da tenere in considerazione è il comportamento del circuito allo spegnimento dell'alimentatore, in questo caso è opportuno scaricare il condensatore di ingresso in un periodo di tempo inferiore al secondo. Infine è opportuno proteggere l'alimentatore da possibili extratensioni provenienti dalla rete di alimentazione utilizzando ad esempio dei soppressori di transiente come i TransZorb TVS o i Transil di tipo bidirezionale.

Per quanto concerne la limitazione di corrente alla prima accensione dell'alimentatore il caso peggiore si ha quando si accende il sistema in

corrispondenza del picco massimo della tensione di rete, in questo caso il condensatore di uscita è scarico pertanto il ponte è come se fosse in cortocircuito, poichè anche il condensatore di ingresso è scarico si ha un percorso a bassissima impedenza fra la fase ed il neutro con conseguente assorbimento impulsivo di corrente dalla rete. Una contromisura efficace ed al contempo poco costosa consiste nell'uso di un resistore di limitazione in serie al condensatore di ingresso, il valore della resistenza sarà calcolato in base alla corrente massima accettata alla partenza e dovrà anche essere ragionevolmente inferiore alla reattanza capacitiva del condensatore di ingresso per evitare di dissipare potenza inutilmente. Assumendo un picco di corrente massimo di 3 A il valore della resistenza sarà pari a circa 120 Ω (si considera la tensione di rete massima). La potenza dissipata da questa resistenza si calcola conoscendo il valore efficace della corrente che attraversa il condensatore di ingresso:

$$P = RI_{eff}^2 = R \frac{I_{C1eff}^2}{2} = 120 \cdot \frac{(184 \cdot 10^{-3})^2}{2} = 2.03 \text{ W}$$

si potrà scegliere un resistore da 120 Ω 3 W.

Per la scarica del condensatore di ingresso si può ipotizzare che la scarica sia completa in un tempo pari a 5 volte la costante di tempo, ipotizzando 0.5 s con una capacità di 1.8 μF si ottiene un valore pari a 56 $k\Omega$. Come altro vincolo, per non alterare le specifiche sulla corrente possiamo assumere che il valore di questa resistenza non sia inferiore ad almeno 10 volte il valore della reattanza capacitiva ovvero circa 18 $k\Omega$. In definitiva si potrà usare una resistenza da 56 $k\Omega$ con potenza 1 W (oppure la serie di due resistori da 33 $k\Omega$ con potenza 0.5 W ciascuno).

Si riporta di seguito lo schema completo dell'alimentatore di esempio comprensivo delle due resistenze di protezione, l'interruttore in serie alla tensione di alimentazione serve solo per simulare lo spegnimento del circuito.

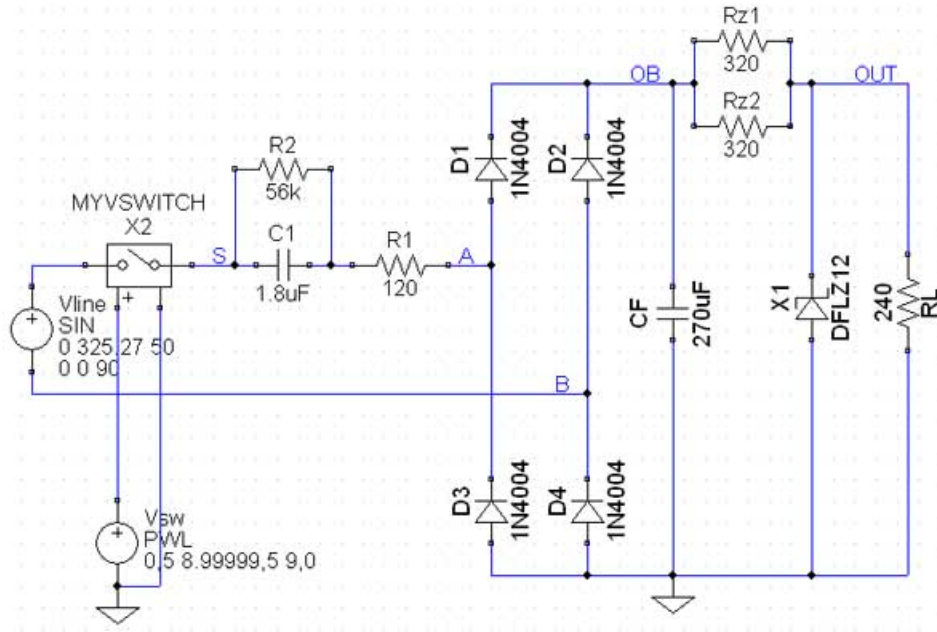


Figura12.gif

Fig. 12 Schema completo delle protezioni per inrush current e scarica.

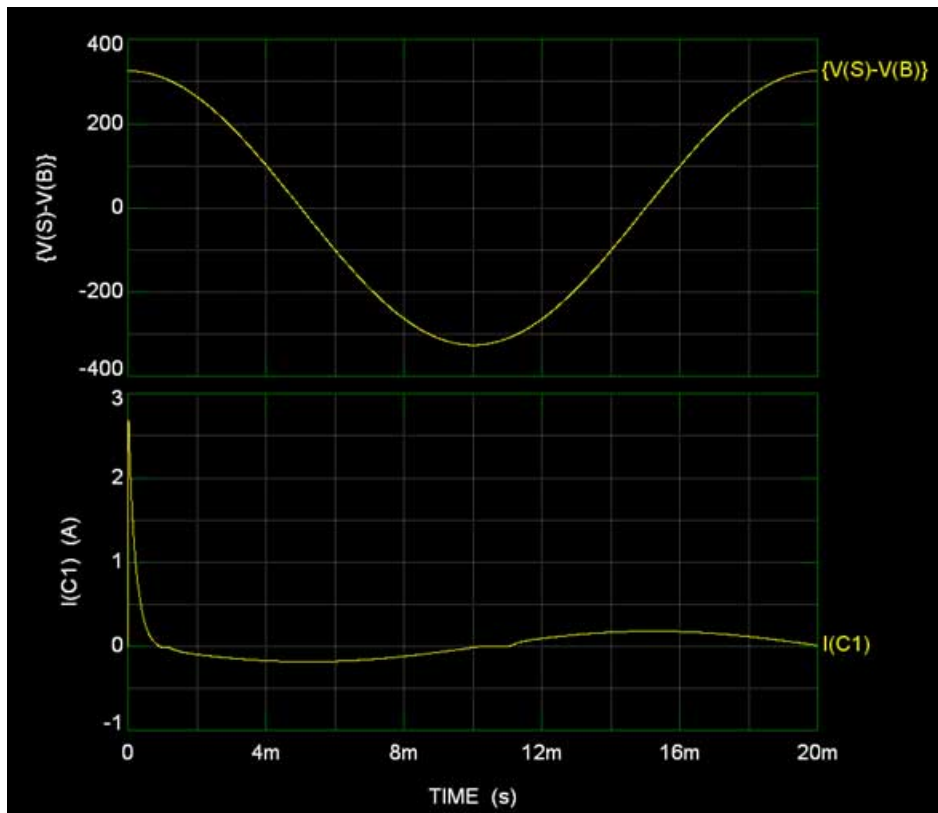


Figura13.jpg

Fig. 13 Dettaglio andamento inrush current per l'alimentatore di figura 12 (230 V @ f=50 Hz).

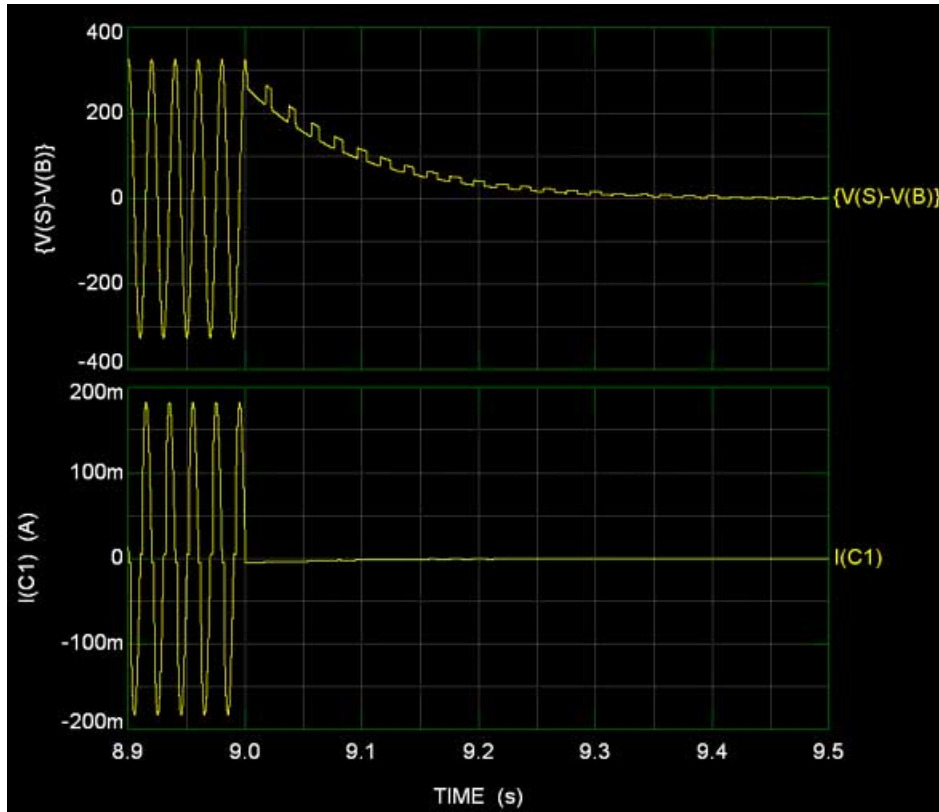


Figura14.jpg

Fig. 14 Dettaglio del transitorio di scarica relativo al condensatore di ingresso C1 (230 V @ f=50 Hz).

Conclusioni

Siamo alla fine di questo breve tutorial sugli alimentatori senza trasformatore, anche detti a reattanza capacitiva dato che si sfrutta la reattanza di un condensatore per ridurre la tensione di rete al valore desiderato.

L'analisi presentata, seppur semplificata rispetto ad un'analisi analitica rigorosa che tenga conto delle varie fasi di funzionamento della rete [1] (figura 3), consente comunque di dimensionare il valore della capacità del condensatore di ingresso in funzione della corrente richiesta in uscita e permette anche di determinare il valore di tensione medio che si potrà avere in uscita dall'alimentatore a patto che la tensione richiesta sia inferiore a 50 V nel caso di alimentazione da rete a 230 V nominali. Nel

caso in cui servano tensioni di uscita di valore maggiore allora si dovrà ricorrere ad una analisi più rigorosa oppure ad un approccio tradizionale con trasformatore.

La corrente massima erogabile in uscita aumenta di circa 65 mA per ogni microfarad della capacità di ingresso C_1 (stima valida considerando la tensione di rete nominale a 230 V @ 50 Hz), nel caso reale è comunque opportuno calcolare il valore della capacità di ingresso ipotizzando di lavorare con la tensione di rete al valore minore.

Lo svantaggio più evidente di questa classe di alimentatori è la mancanza di isolamento fra la parte sottoposta alla tensione di rete e la parte di uscita a bassa tensione.

Si hanno perdite di potenza legate al contenimento della inrush current.

Questo tipo di alimentatori non deve mai funzionare a vuoto, in questo caso la tensione di uscita assume valori prossimi alla tensione di picco di rete.

Un vantaggio è legato alla protezione intrinseca contro il corto circuito sul lato di uscita, in questo frangente infatti la massima corrente è determinata solo ed esclusivamente dal valore della capacità di ingresso.

Bibliografia

[1] Nathan O. Sokal, K. Kit Sum, David C. Hamill, "A Capacitor-Fed, Voltage-Step-Down, Single-Phase, Non-Isolated Rectifier", APEC 1998, Volume 1, Issue , 15-19 Feb 1998 Page(s):208 - 215 vol.1 [\[1\]](#)

[2] Microchip AN954, "Transformerless Power Supplies: Resistive and Capacitive" [\[2\]](#)

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Powermos:transformerless>"