

CAPITOLO 10

ALIMENTATORI

Per funzionare, la maggior parte dei dispositivi e dei circuiti elettronici richiede un'alimentazione in tensione continua, singola o duale. Le tensioni richieste sono normalmente comprese tra qualche volt e qualche decina di volt, con valori di corrente che possono andare da qualche mA alle decine di ampere.

Per questo scopo vengono comunemente impiegati *alimentatori e batterie*. Queste ultime sono però riservate essenzialmente alle apparecchiature portatili a causa della loro durata limitata e del costo relativamente elevato. Più frequentemente sono adoperati gli alimentatori (*power supply*), sistemi in grado di *convertire* (e ridurre) la tensione alternata di rete in tensione continua.

In questo capitolo, prenderemo in esame tre tipi di strutture di alimentatori: gli *alimentatori non stabilizzati (unregulated power supply)*, gli *alimentatori stabilizzati (regulated power supply)* e gli *alimentatori a commutazione o switching (SMPS: switched mode power supply)*.

10.1 Alimentatori non stabilizzati

Per alcune applicazioni, ad esempio gli amplificatori finali audio, può essere sufficiente il cosiddetto *alimentatore non stabilizzato*, la cui struttura a blocchi è illustrata in Fig. 10.1.

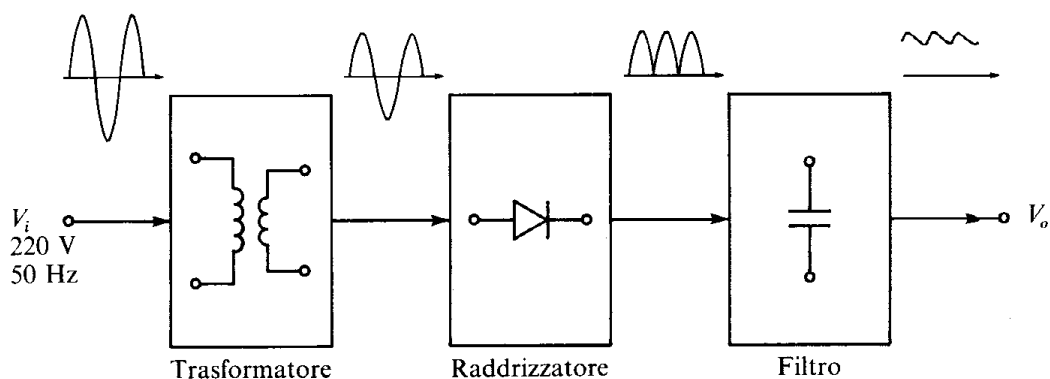


Fig. 10.1 – Schema a blocchi dell'alimentatore non stabilizzato

La tensione alternata di rete V_s , ridotta in ampiezza dal trasformatore, viene raddrizzata e successivamente filtrata in modo da alimentare un carico. Il residuo di alternata (*ripple*) in uscita è però elevato; inoltre la tensione di uscita V_o non è stabile nei confronti delle *variazioni della tensione di rete e del carico*.

Nella sua forma più comune l'alimentatore non stabilizzato è costituito da un trasformatore, da un raddrizzatore e da un filtro capacitivo. A secondo del tipo di raddrizzatore impiegato, si possono avere le tre configurazioni base illustrate in Fig. 10.2.

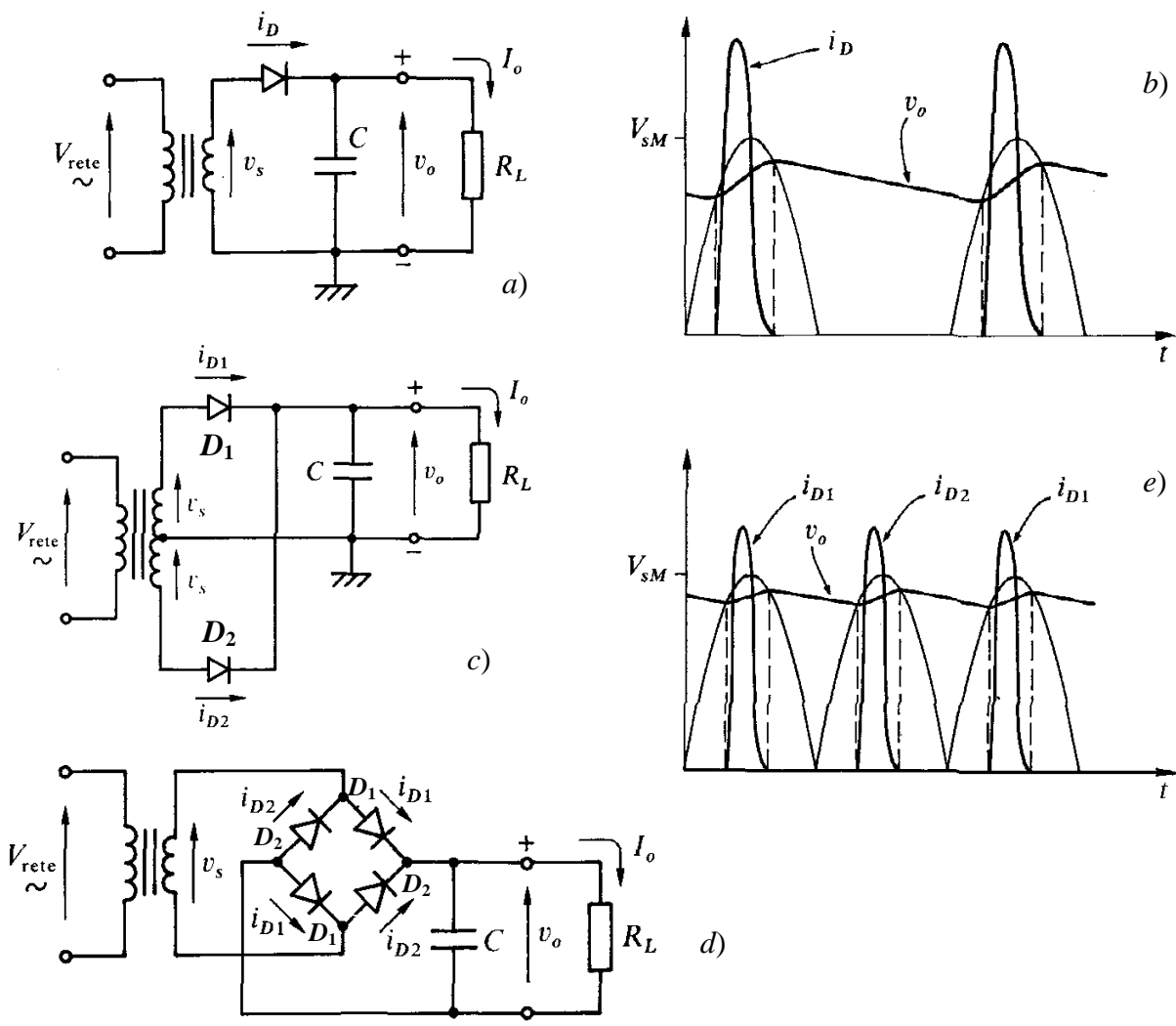


Fig. 10.2 – a) Raddrizzatore ad una semionda. b) Forme d'onda relative al raddrizzatore ad una semionda. c) Raddrizzatore a doppia semionda a presa centrale. d) Raddrizzatore a doppia semionda a ponte. e) Forme d'onda relative al raddrizzatore a doppia semionda

Il raddrizzatore di Fig. 10.2a, *ad una semionda* viene usato quando sono richieste basse potenze e basse correnti di carico. Il diodo in ciascun periodo conduce solamente nel breve intervallo in cui la tensione al secondario v_s supera la tensione v_o sul condensatore. Per la rimanente parte del periodo il diodo è interdetto e la corrente viene fornita al carico dal condensatore stesso, che, scaricandosi, produce un'accentuata *ondulazione (ripple)* nella tensione di uscita. La carica del condensatore è rapida poiché la costante di tempo dipende dalla (bassa) resistenza del diodo in conduzione e del secondario del trasformatore, mentre la scarica, più lunga, dipende dalla resistenza di carico R_L .

In Fig. 10.2b è illustrato l'andamento della corrente nel diodo e della tensione d'uscita; con linea più sottile è inoltre indicata la tensione al secondario. Come si può notare, a causa della caduta di tensione sul diodo, la tensione d'uscita rimane sempre inferiore al valore di picco V_{sM} della tensione sul secondario.

Questo tipo di alimentatore, oltre ad un ripple elevato, presenta un forte picco della corrente i_D , che deve provvedere nel breve intervallo di conduzione del diodo alla ricarica del condensatore.

Viceversa nei *raddrizzatori a doppia semionda*, sia *a presa centrale* (Fig. 10.2c), che *a ponte* (Fig. 10.2d), la tensione v_s raddrizzata consente la ricarica del condensatore in ogni semiperiodo (Fig. 10.2e). L'ondulazione ed il picco di corrente nei diodi, a parità di corrente di uscita I_o , risultano così più contenuti rispetto al caso precedente.

I due raddrizzatori a doppia semionda si comportano però diversamente per quanto riguarda la *massima tensione inversa PIV (peak inverse voltage)* che i diodi devono sopportare. Nel raddrizzatore a presa centrale, come del resto in quello a semionda, ai capi del diodo interdetto si stabilisce una PIV che può calcolarsi semplicemente considerando la maglia comprendente i due diodi; se il diodo D_1 è interdetto, il D_2 risulta cortocircuitato, e quindi ai capi del diodo D_1 la massima tensione inversa risulta $2V_{sM}$ (stesso risultato si ottiene se si considera la maglia comprendente il diodo D_1 e il carico, avendosi $PIV = V_o - (-V_{sM}) \approx 2V_{sM}$). Viceversa nel raddrizzatore a ponte, nell'ipotesi che i diodi D_1 siano interdetti, e che quindi i diodi D_2 siano in conduzione, se si considera la maglia formata dal secondario del trasformatore e da due diodi D_1 e D_2 , si ottiene $PIV = V_{sM}$.

I raddrizzatori a ponte, pertanto, presentano il vantaggio di avere dei diodi che devono sopportare una massima tensione inversa pari alla metà rispetto alla PIV di quelli a presa centrale. Per tale motivo, il raddrizzatore a ponte è il più utilizzato negli alimentatori, sebbene impieghi un numero maggiore di diodi. In commercio esistono ponti assemblati in un unico contenitore plastico, adatti per una gran varietà di correnti e di tensioni.

Un'altra ragione per la quale i raddrizzatori a ponte risultano preferibili a quelli a presa centrale è che con essi possono facilmente realizzarsi *alimentatori duali*, che forniscono, cioè, tensioni simmetriche. Ciò è di grande utilità in molti dispositivi, come ad esempio, negli amplificatori operazionali. Lo schema di un alimentatore duale è riportato in Fig. 10.3.

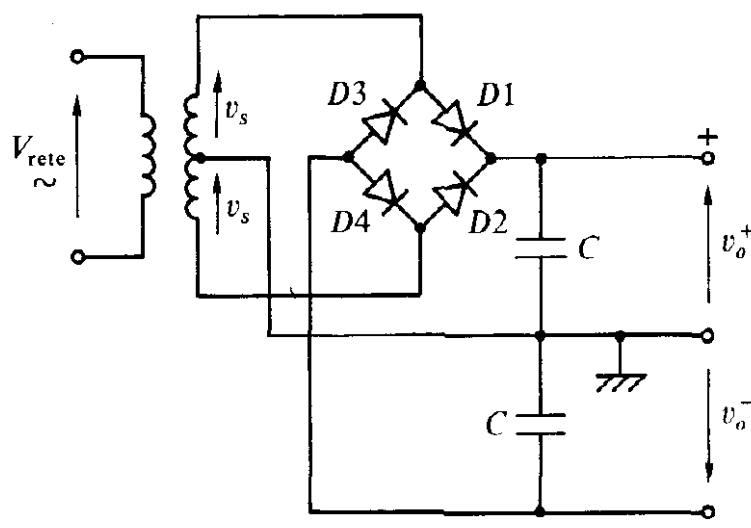


Fig. 10.3 – Alimentatore duale

Nella semionda positiva di v_s conducono $D1$ per l'uscita positiva e $D4$ per l'uscita negativa. Nella semionda negativa conducono rispettivamente $D2$ e $D3$.

10.2 Alimentatori stabilizzati (lineari)

Gli *alimentatori stabilizzati* si dividono in due categorie: *lineari* e *a commutazione*. Lo studio di quelli del secondo tipo verrà affrontato nel paragrafo successivo. La configurazione di un *alimentatore lineare* è tipicamente quella di Fig. 10.4, dove a valle di un alimentatore non stabilizzato viene posto un circuito *stabilizzatore* o *regolatore*. Questo dispositivo, tramite un anello di reazione negativa, “sente” la tensione di uscita, la confronta con una *tensione di riferimento* stabile e costante ed agisce su un elemento di controllo – spesso un transistor inserito in serie o in parallelo al carico – in modo da mantenere l'uscita stabile.

Il tipo più semplice di stabilizzatore di tensione è quello con diodo Zener, già analizzato nel Cap. 5 e illustrato in Fig. 5.16b. Questo tipo di regolatori sono anche detti di tipo *parallelo* o *shunt*, dato che in essi l'elemento di controllo (Zener) è posto direttamente in parallelo al carico. Un limite di tali regolatori è costituito dalla ridotta escursione che può avere la corrente d'uscita. Infatti, dal momento che la tensione sulla resistenza R di polarizzazione, e quindi la corrente I che scorre in

essa, rimangono sostanzialmente costanti, riducendo la corrente sul carico I_L si aumenta della stessa quantità la corrente I_Z che attraversa lo Zener e viceversa. Nei diodi Zener però l'escursione di I_Z è piuttosto limitata (da qualche mA ad alcune decine di mA), sicché risulta limitato anche il campo di variazione di I_L .

Per tale motivo, sono molto più utilizzati i regolatori di tipo *serie*, sia in forma discreta che integrata, così denominati per la posizione che assume l'elemento di controllo rispetto al carico.

La struttura generale di un regolatore di tipo serie è illustrata in Fig. 10.4.

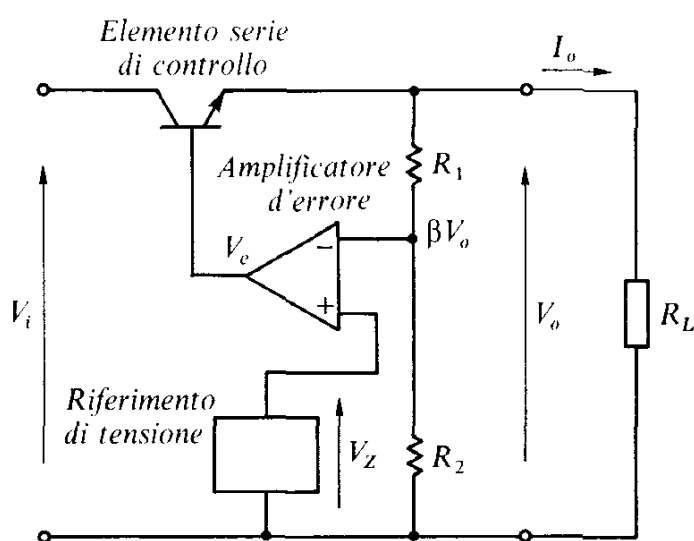


Fig. 10.4 – Struttura generale di un regolatore di tipo serie

Un amplificatore d'errore confronta una parte della tensione d'uscita [$\beta V_o = R_2 V_o / (R_1 + R_2)$] con una tensione di riferimento V_Z , precisa e stabile. L'uscita V_e dell'amplificatore comanda un elemento di controllo – normalmente un BJT – posto in serie al carico, che varia la tensione ai suoi capi in modo da contrastare eventuali variazioni di I_o . Se ad esempio V_o aumenta per effetto di un aumento di V_i , aumenta anche βV_o e diminuisce il segnale d'uscita dell'amplificatore V_e (dato che questi agisce come un amplificatore differenziale). In questo modo, dato che V_e pilota la base del transistor, quest'ultimo conduce di meno: la tensione V_{CE} allora aumenta, assorbendo la maggior parte dell'aumento di V_i e limitando così fortemente l'aumento di V_o . L'effetto stabilizzante è tanto migliore quanto più la tensione di riferimento è stabile e quanto maggiore è il guadagno dell'anello.

Attualmente è disponibile sul mercato una vasta gamma di regolatori lineari *integrati*, che associano ad elevate prestazioni i pregi di una notevole facilità d'impiego, di un costo contenuto e di un ingombro estremamente ridotto.

La struttura base è la stessa già studiata in Fig. 10.4, alla quale devono essere aggiunti una serie di circuiti interni di protezione. Normalmente le protezioni consistono nella limitazione della corrente di uscita, nella protezione termica e nella protezione SOA (*safe operation area*, area di funzionamento sicuro), La protezione SOA impedisce che il punto di riposo dell'elemento serie esca dall'area di funzionamento sicuro, riducendo automaticamente la corrente che attraversa il dispositivo.

Regolatori integrati molto diffusi sono i cosiddetti regolatori a tre terminali (*ingresso*, *uscita* e *massa*): essi forniscono in uscita una tensione fissa con correnti di $1 \div 1,5$ A. Il loro impiego tipico è *on-card*, il che significa che essi vengono montati direttamente sulla scheda da alimentare, evitando così le cadute di tensione e i disturbi lungo i cavi di alimentazione. Un unico alimentatore non stabilizzato provvede a sua volta ad alimentare i regolatori delle varie schede.

In commercio sono disponibili regolatori integrati a tre terminali *a uscita fissa* e *a uscita variabile*. Appartengono al primo tipo le serie 78XX e LM340 che forniscono tensioni positive e le serie 79XX^(♥) e LM320 per tensioni negative. I parametri caratteristici di questi dispositivi, oltre alla *tensione* e alla *corrente massima di uscita*, sono il *dropout*, ossia la tensione minima fra ingresso e uscita che consente un funzionamento corretto, la *corrente di riposo*, assorbita dall'integrato e non erogata al carico (fuoriesce dal terminale GND – *ground* – posto a massa).

Nei manuali le case costruttrici consigliano di connettere in ingresso e in uscita due condensatori come indicato in Fig. 10.5.

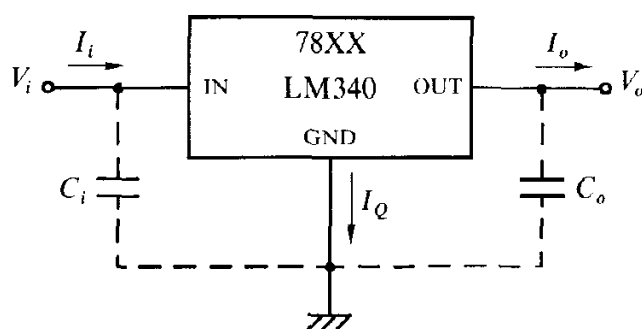


Fig. 10.5 – *Regolatore a tre terminali a uscita fissa con condensatori esterni*

Il condensatore C_i compensa la componente induttiva dei collegamenti se questi sono troppo lunghi, mentre C_o migliora la risposta ai transitori del carico.

^(♥) Per la precisione sono disponibili in commercio gli integrati 7805, 7806, 7808, 7810, 7812, 7815, 7818, 7824 per la serie 78XX e 7905, 7906, 7908, 7910, 7912, 7915, 7818, 7824 per la serie 79XX, dove le ultime due cifre indicano la tensione d'uscita fornita (positiva per la serie 78XX, negativa per la 79XX).

Con i regolatori a uscita fissa è tuttavia possibile ottenere una tensione variabile, utilizzando la configurazione circuitale riportata in Fig. 10.6a.

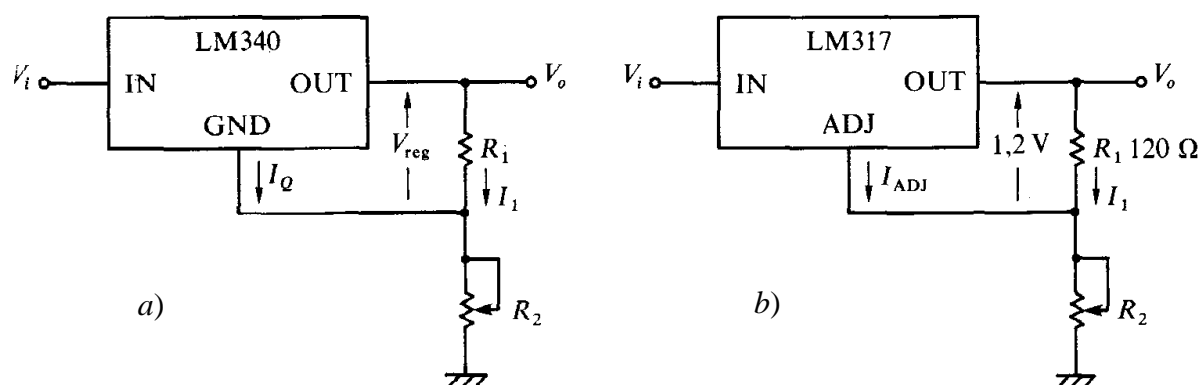


Fig. 10.6 – Schema applicativo di regolatore variabile a) con LM340; b) con LM317

Indicando con V_{reg} la tensione regolata all'uscita dell'integrato e con I_Q la corrente di riposo uscente dal terminale GND, si può scrivere:

$$\begin{aligned} V_o &= V_{reg} + R_2(I_Q + I_1) = \\ &= V_{reg} + R_2 I_Q + R_2 \frac{V_{reg}}{R_1} = \\ &= V_{reg} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + R_2 I_Q. \end{aligned} \quad (10.1)$$

In questo modo, tuttavia, l'uscita V_o dipende dalla corrente I_Q , il cui valore tipico è circa 10 mA, la quale a sua volta subisce variazioni con il carico (dato che I_Q è la corrente di riposo).

Per ovviare a tale inconveniente sono stati introdotti i cosiddetti regolatori *ad uscita variabile* (*adjustable regulator*). Ne è un esempio il regolatore LM317, in cui il pin GND è sostituito dal pin ADJ (*adjustment*). La differenza, ovviamente, non è solo "linguistica": la corrente I_{ADJ} in uscita da tale piedino risulta costante e molto piccola, dell'ordine di 50 μ A. Essa è pertanto trascurabile nel calcolo della tensione V_o . La tensione d'uscita del regolatore tra i piedini OUT e ADJ è sempre uguale a 1,2 V. L'uscita variabile viene ottenuta utilizzando la configurazione di Fig. 10.6b. Tale schema è in sostanza identico a quello di Fig. 10.6a, soltanto che in questo caso la corrente I_{ADJ} è trascurabile, per cui risulta

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \times 1,2 \text{ V} + R_2 \times 50 \cdot 10^{-6} \text{ A} \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \times 1,2 \text{ V}. \quad (10.2)$$

Come si vede, aumentando R_2 aumenta la tensione d'uscita ottenibile, che può variare da 1,2 V ad un massimo di 37 V.

In questi regolatori variabili la corrente di riposo dell'integrato è ancora tipicamente di 10 mA; essa viene però fatta uscire dal terminale OUT insieme con la corrente di carico (anziché da ADJ). È allora necessario per un corretto funzionamento che questa corrente possa scorrere anche nel caso di carico R_2 scollegato. Per tale motivo il costruttore consiglia per R_1 il valore $1,2 \text{ V} / 10 \text{ mA} = 120 \Omega$ (come è stato fatto in Fig. 10.6b).

10.3 Alimentatori stabilizzati a commutazione (o switching)

Gli alimentatori stabilizzati lineari, sebbene efficaci ed affidabili, presentano nondimeno alcuni inconvenienti:

- presentano un'elevata dissipazione di potenza sull'elemento di controllo, riducendo pertanto il rendimento dell'alimentatore: ciò inoltre obbliga a ricorrere a dissipatori di calore voluminosi;
- il trasformatore di rete (a bassa frequenza) presenta un notevole ingombro sia in peso che in dimensioni.

Per tali motivi l'impiego di tali alimentatori viene limitato al campo delle *basse potenze* ($< 50 \text{ W}$).

Gli *alimentatori a commutazione*, o *alimentatori switching*, ovviano a questi inconvenienti facendo lavorare l'elemento di controllo *in commutazione* ed a *frequenza piuttosto elevata* ($20 \div 200 \text{ kHz}$). Diminuisce in tal modo la potenza dissipata sull'elemento di controllo e così pure le dimensioni dei componenti reattivi, quali trasformatore, induttori e condensatori di filtro. Il rendimento dell'alimentatore passa dal $30 \div 50 \%$ tipico degli alimentatori lineari, al $70 \div 90 \%$.

Lo schema elettrico di un alimentatore switching è molto più complesso di quello di un alimentatore lineare. Lo schema a blocchi è rappresentato in Fig. 10.7.

All'ingresso dell'alimentatore troviamo direttamente il *raddrizzatore* insieme ad un *filtro capacitivo*, che risultano pertanto connessi alla rete elettrica. Il *trasformatore* è invece posto più avanti a valle del blocco d'ingresso. La particolarità di tale trasformatore è che esso lavora ad alta frequenza: infatti all'interno dell'*inverter*, detto anche *convertitore DC/AC*, la tensione raddrizzata proveniente dal filtro d'ingresso viene trasformata in una tensione alternata "chopped", ossia in un'onda quadra a frequenza elevata. Ciò viene realizzato da un transistor, controllato in commutazione da un opportuno *regolatore switching*. Il trasformatore è di tipo ad alta frequenza: esso presenta ridotte dimensioni e un nucleo in ferrite (nei trasformatori a bassa frequenza, invece, il nucleo è tipicamente composto da lamierini di ferro e risulta piuttosto pesante).

L'onda quadra in uscita dall'inverter viene ulteriormente raddrizzata e filtrata (blocco *raddrizzatore e filtro d'uscita*); si noti che il filtro è di tipo LC, dato che il segnale da filtrare è ad alta frequenza. L'inverter, il raddrizzatore e il filtro d'uscita formano il *convertitore DC/DC*.

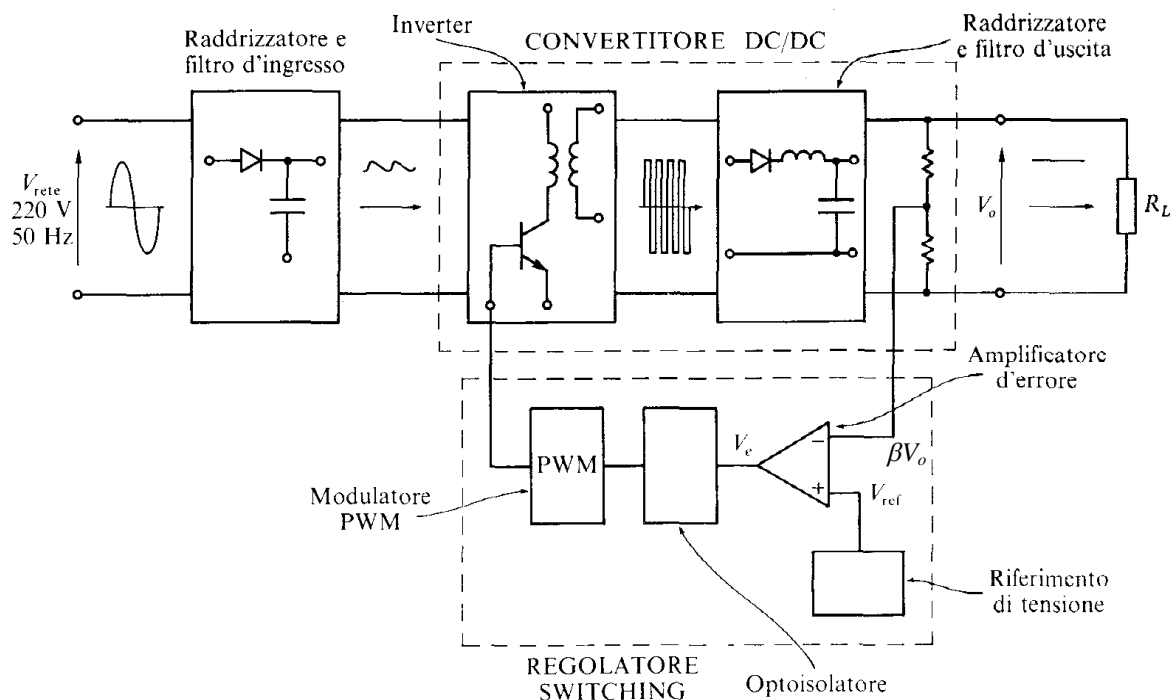


Fig. 10.7 – Schema a blocchi di un alimentatore switching

Al carico viene infine fornita una tensione continua, che viene *stabilizzata* dal blocco *regolatore switching* tramite un anello di controreazione. Tale regolatore agisce variando il *duty cycle* (rapporto tra la durata in cui l'onda – in un periodo – è a livello alto e il periodo dell'onda stessa) dell'onda quadra prodotta dall'inverter. Ciò è realizzato tramite un *modulatore di larghezza di impulsi* o *PWM* (*pulse width modulation*). Più precisamente, un *amplificatore d'errore* confronta una frazione del segnale d'uscita (βV_o) con una tensione di riferimento (V_{ref}), producendo un segnale d'errore V_e . Tale segnale a sua volta controlla il modulatore PWM che *allarga o restringe il duty cycle* (mantenendo la frequenza costante) così come indicato nell'esempio di Fig. 10.8. In Fig. 10.8a si ha uno schema più dettagliato del regolatore switching, mentre in Fig. 10.8b sono rappresentate le forme d'onda relative al modulatore PWM.

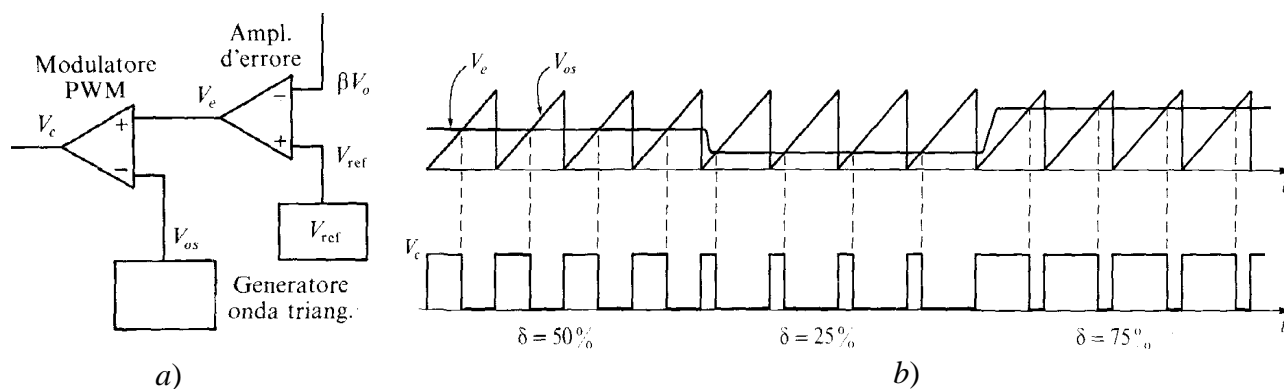


Fig. 10.8 – a) Schema di un regolatore switching. b) Forme d'onda in ingresso e in uscita del modulatore PWM

Il modulatore PWM è in pratica un comparatore provvisto di due ingressi: il primo costituito da un'onda triangolare V_{os} e il secondo dal segnale d'errore V_e . Supponiamo che la tensione d'uscita subisca un aumento dovuto ad una variazione di qualche parametro esterno: aumenta di conseguenza βV_o e diminuisce $V_e (= V_{ref} - \beta V_o)$. L'uscita del modulatore PWM subisce allora una diminuzione del suo duty cycle. Poiché è possibile dimostrare che la tensione d'uscita è proporzionale al duty cycle, essa subisce una riduzione che compensa l'aumento iniziale, mantenendo pertanto un'uscita stabile.

A causa della presenza del trasformatore all'interno dell'inverter, lavorando in commutazione possono nascere dei picchi di tensione molto elevati. Per tale motivo, nel blocco regolatore si inserisce un *optoisolatore* che realizza un isolamento galvanico nell'anello di controreazione (in caso di impulsi di tensione molto elevati, si satura semplicemente il transistor d'uscita dell'optoisolatore).

10.4 Note applicative sugli alimentatori da laboratorio

Sul mercato è disponibile una vasta gamma di alimentatori stabilizzati – tipicamente per applicazioni da laboratorio – con caratteristiche, prestazioni e costi assai vari.

La tensione di uscita è normalmente regolabile in un campo più o meno esteso, a seconda del tipo di utilizzo. La tensione di uscita nominale, eventualmente prescelta dall'utente, si mantiene sostanzialmente costante al variare del carico da valori $R_L = \infty$ (tensione a vuoto) fino ad $R_L = R_C$, resistenza critica, a cui corrisponde la massima corrente erogabile I_{LM} . Ad esempio, un alimentatore con tensione $0 \div 30$ V e corrente $0 \div 1$ A potrà fornire qualunque tensione fino a 30 V con qualunque corrente fino ad 1 A. In Fig. 10.9 sono illustrate alcune curve di regolazione indicative (tensione-corrente), riferite ad alimentatori stabilizzati.

Nel caso di Fig. 10.9a si tratta di un alimentatore *a tensione e corrente costanti*. Per $R_L > R_C$, cioè per $I_L < I_{LM}$, la tensione si mantiene costante. Viceversa per $R_L < R_C$ la corrente si mantiene costante a I_{LM} mentre V_o diminuisce. In questo modo si è sicuri che, qualunque sia il carico (al limite anche un cortocircuito), V_o e I_L non superano i valori impostati e sia l'alimentatore che il carico non corrono alcun rischio.

Nel caso di Fig. 10.9b si tratta di un alimentatore di minor pregio del precedente: il tratto di discesa della curva di regolazione è meno verticale e I_L può crescere oltre I_{LM} (generalmente del 2 ÷ 20%). La curva di Fig. 10.9c si riferisce infine ad un alimentatore *con limite di corrente all'indietro (foldback)*: superata I_{LM} , non solo scende la tensione, ma anche la corrente, limitando così la potenza dissipata. Gli alimentatori da laboratorio sono generalmente forniti di due manopole di regolazione, una per la tensione V_o ed una per il limite di corrente I_{LM} . Al di sotto del valore di corrente massimo, la tensione è praticamente costante: ciò implica una resistenza interna del generatore molto bassa.

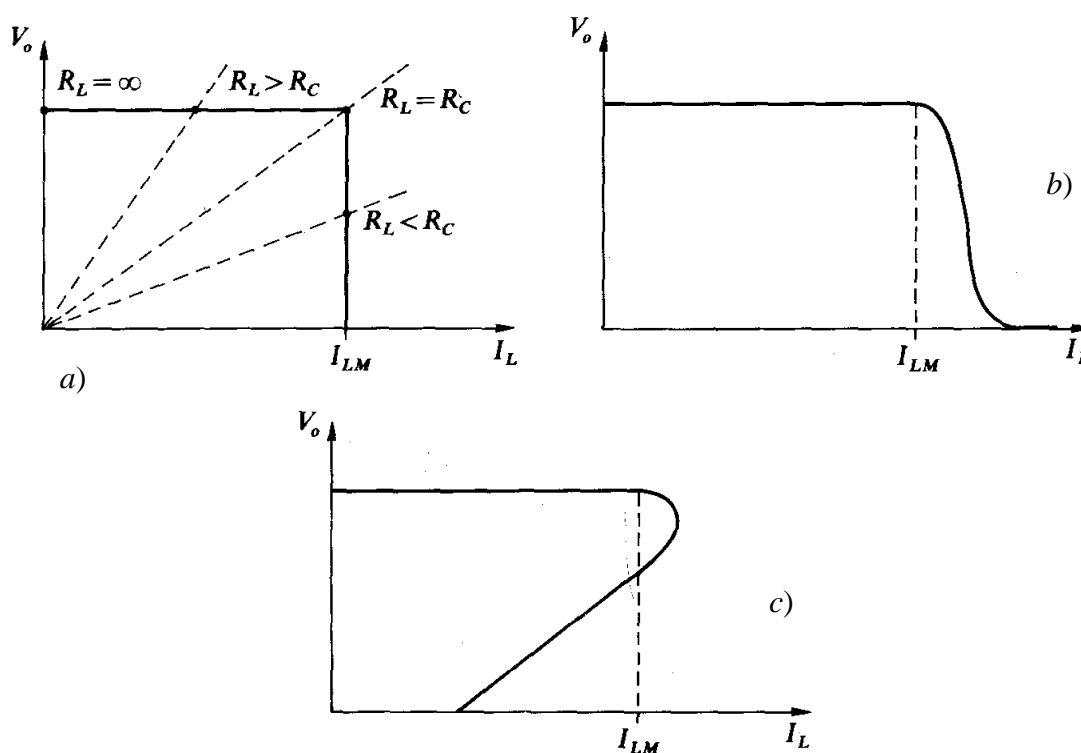


Fig. 10.9 – Curve di regolazione di alimentatori stabilizzati a) a tensione e correnti costanti; b) come nel caso a) ma di minor pregio; c) di tipo foldback

Generalmente i costruttori forniscono indicazioni circa la *stabilità* della tensione rispetto alle *variazioni del carico*, la *stabilizzazione di rete*, cioè la variazione percentuale della tensione di uscita a causa della variazione della tensione di rete, l'*ondulazione residua (ripple)*, che si riferisce al fatto che la tensione di uscita non è perfettamente continua, ma presenta sempre una lieve componente variabile con una conseguente leggera ondulazione, il *tempo di ripristino (recovery time)*, che fornisce informazioni sulla capacità dell'alimentatore ad adattarsi a brusche variazioni di carico, il *coefficiente di temperatura*, che fornisce la variazione percentuale della tensione di uscita per grado centigrado. A titolo di esempio, in Tab. 10.1 sono sintetizzate le prestazioni dell'alimentatore a tre uscite Philips PE 1542.

Tab. 10.1 – Prestazioni dell'alimentatore Philips PE 1542

PERFORMANCE TABLE

| | I | PE 1542 II | III |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| CONSTANT VOLTAGE OPERATION | | | |
| Output voltage ranges | | | |
| Continuously adjustable (V) | 0...20 | 0...20 | 0...7 |
| Stability against line variations | | | |
| With $\pm 10\%$ line variations max. change of output voltage incl. short term drift | $\leq 0.05\%$ or 2mV* | $\leq 0.05\%$ or 2mV* | $\leq 0.05\%$ or 2mV* |
| Recovery time | | | |
| For a sudden increase from 80% load to max. load or for a corresponding decrement (μ s) | ≤ 25 | ≤ 25 | ≤ 25 |
| Ripple voltage (mV_{RMS}) | < 1.5 | < 1.5 | < 1.5 |
| Temperature coefficient (0...40°C) (%/°C) | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| CONSTANT CURRENT OPERATION | | | |
| Output current ranges | | | |
| Continuously adjustable (A) | 0...1 | 0...1 | 0...3 |
| Stability against line variations | | | |
| With $\pm 10\%$ line voltage variations max. change of output current incl. short term drift | $\leq 0.5\%$ or 3mA* | $\leq 0.5\%$ or 1mA* | $\leq 0.5\%$ or 1mA* |
| Stability against load variations | | | |
| With load variations of 0...100% max. change of output current (mA) | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Ripple current (mA_{RMS}) | ≤ 1.5 | ≤ 0.5 | ≤ 0.5 |
| Temperature coefficient (0...40°C) (mA/°C) | ≤ 2 | ≤ 0.2 | ≤ 0.6 |

La maggior parte degli alimentatori ha il proprio circuito isolato sia dalla rete che dal contenitore metallico; la tensione di uscita viene fornita mediante due morsetti, che costituiscono il polo positivo e il polo negativo del generatore (Fig. 10.10).

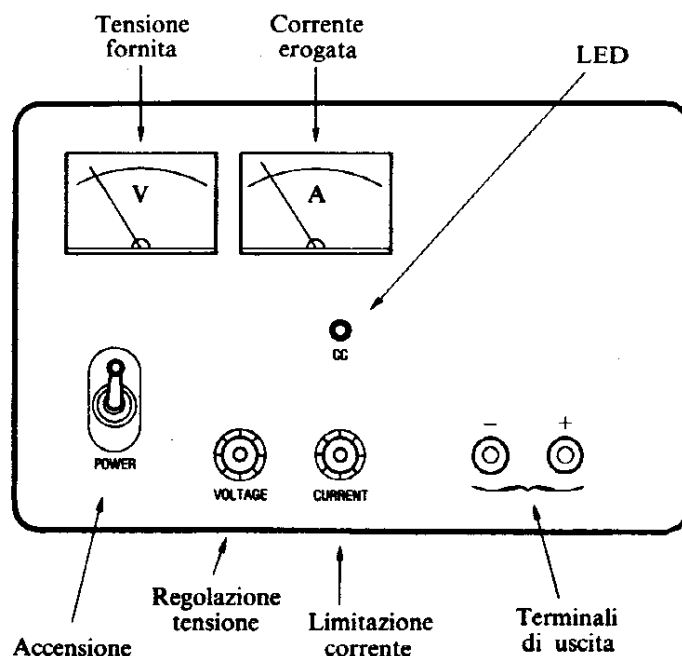


Fig. 10.10 – Pannello frontale di un alimentatore stabilizzato

Collegando uno dei due terminali alla massa comune del circuito di carico, l'altro terminale fornirà ovviamente una tensione negativa o positiva rispetto alla massa comune. In molti casi lo stesso strumento fornisce uscite multiple, positive e negative; ciò è particolarmente comodo quando si debbano alimentare i circuiti con diverse tensioni, come nel caso degli amplificatori operazionali, in cui è richiesta un'alimentazione duale (cfr. Cap. 3). Lo schema di collegamento è allora quello mostrato in Fig. 10.11.

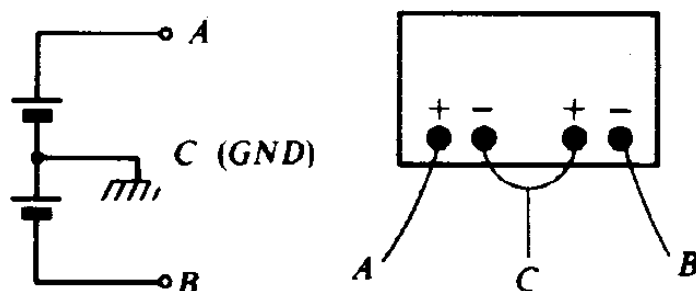


Fig. 10.11 – Collegamento per alimentazione duale