

MISURE SU UN ALIMENTATORE STABILIZZATO

1 – Introduzione

L'alimentatore stabilizzato è uno degli strumenti più diffusi in laboratorio, poiché genera la tensione continua normalmente usata per alimentare i circuiti elettronici in prova.

Per rendere flessibile lo strumento, è generalmente prevista la possibilità di regolare con continuità più o meno finemente, la tensione di uscita da 0V al valore massimo di specifica.

Un alimentatore stabilizzato idealmente deve soddisfare alle seguenti caratteristiche essenziali:

1. la tensione V_{DC} di uscita deve essere costante per qualsiasi valore di corrente continua erogata minore della corrente massima di specifica (caratteristica indicata anche come "load regulation") (figura 1);

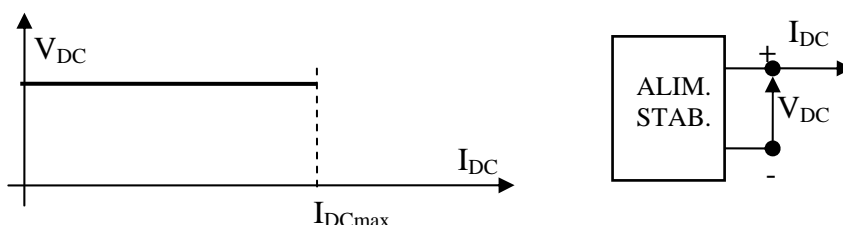


fig. 1

2. la tensione di uscita deve essere costante anche se la corrente assorbita dal carico varia rapidamente nel tempo (cioè l'impedenza equivalente di uscita deve essere idealmente nulla);

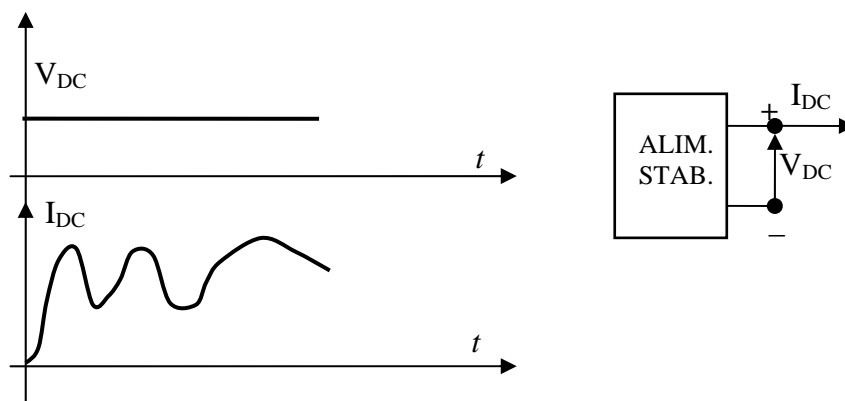


fig. 2

3. la tensione di uscita deve essere insensibile alle variazioni della tensione di rete ($V_{AC}=220\text{ V} \pm x\%$), caratteristica indicata come "line regulation" (figura 3);

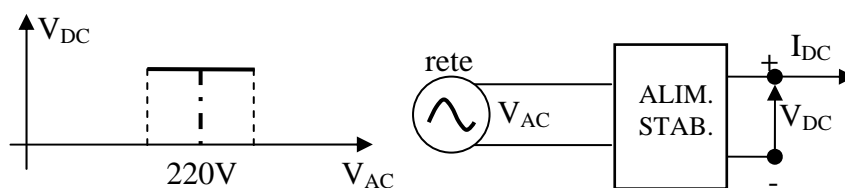


fig. 3

- il residuo di alternata (“ripple”), presente sulla tensione continua di uscita, che deriva dal processo di raddrizzamento e filtraggio della tensione di rete deve essere molto piccolo (ordine di grandezza dei millivolt).

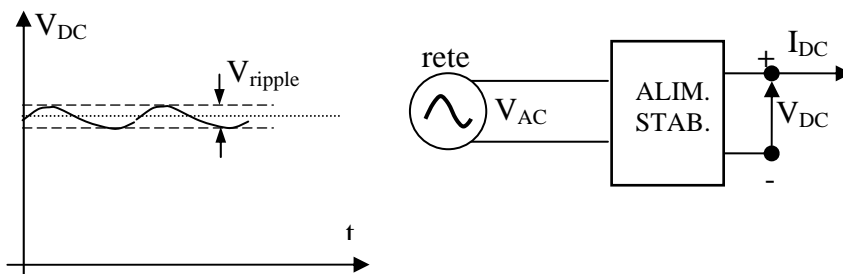


fig. 4

2 – Parametri che caratterizzano l'alimentatore stabilizzato

Per caratterizzare sperimentalmente l'alimentatore dal punto di vista delle caratteristiche elencate nel precedente paragrafo, sono misurate le seguenti grandezze, ciascuna correlata con i punti sopra elencati:

- La resistenza equivalente di uscita R_0 , responsabile della diminuzione della V_{DC} al variare della I_{DC} (vedi figura 5)

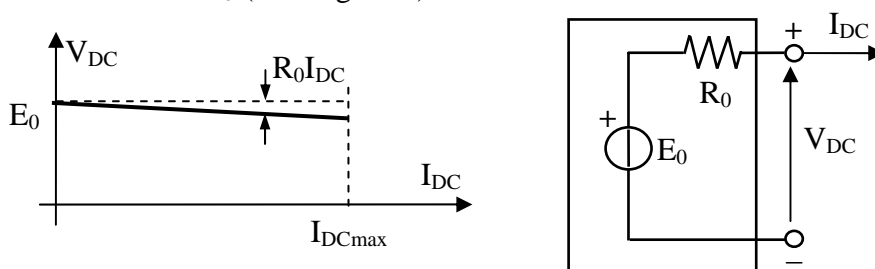


fig. 5

- L'impedenza equivalente di uscita, misurata in due particolari condizioni:
 - carico che assorbe una corrente di tipo sinusoidale (impedenza di uscita in regime sinusoidale)
 - carico che assorbe una corrente impulsata (ON/OFF) (caratteristica definita dal tempo di riassetto ("recovery time").
- Il fattore di regolazione di rete misurato dalla variazione di E_0 al variare del valore efficace della tensione alternata di alimentazione
- Il valore picco-picco della tensione di ripple in uscita in corrispondenza di un valore definito di corrente I_{DC} erogata

3 – Considerazioni sull'uso dell'alimentatore stabilizzato

L'alimentatore stabilizzato ideale corrisponde all'implementazione di un generatore ideale di tensione.

La realizzazione circuitale è basata su un circuito controreazionato in cui si fa in modo di mantenere costante la tensione in uscita al variare sia della corrente erogata sul carico,

sia della tensione alternata di alimentazione, utilizzando una sorgente di tensione continua stabile come riferimento interno allo strumento.

La corrente erogata dall'alimentatore non può superare un valore limite di progetto imposto dal tipo circuito e dai componenti adottati. La caratteristica di uscita viene limitata pertanto mediante un circuito di protezione che, se la corrente erogata supera il valore massimo fissato I_{DCmax} , impone una riduzione della tensione di uscita.

La caratteristica di uscita quindi presenta un andamento del tipo di figura 6 in cui si può regolare sia il valore di E_0 sia il valore della corrente I_{DCmax} .

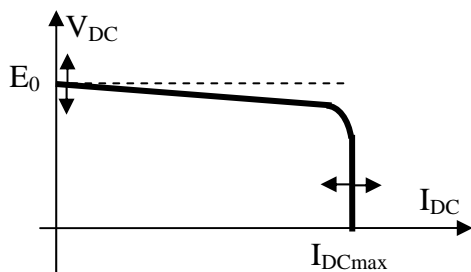


Fig.6

Quando l'alimentatore è caricato con una resistenza R_L , si stabilisce un punto di lavoro (corrente erogata I_L e tensione sul carico V_L) imposte dall'intersezione delle due caratteristiche del generatore e del carico (vedi figura 7).

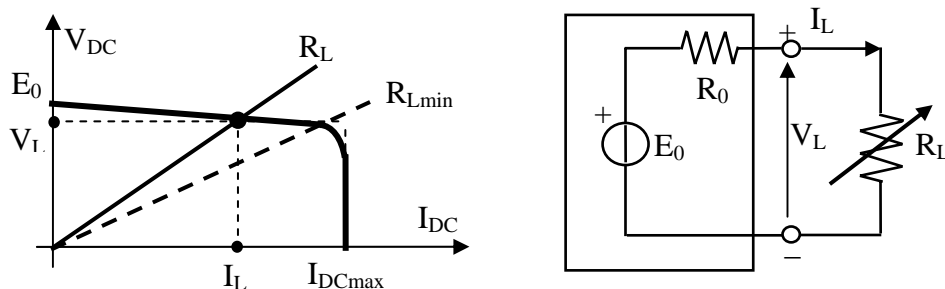


Fig.7

A causa della R_0 dell'alimentatore la tensione di uscita V_L varia al variare del carico, riducendosi al diminuire della resistenza R_L .

Al di sotto di un valore R_{Lmin} , che dipende dalla I_{DCmax} impostata, la V_L si riduce in maniera consistente e quindi viene meno la funzione di stabilizzazione di tensione dell'alimentatore.

Per $R_L=0$ (corto-circuito) la V_L viene azzerata dal circuito interno di protezione (se non fosse così l'alimentatore dovrebbe erogare una corrente $I_{DC} \rightarrow \infty$).

La resistenza R_0 è dovuta alla non perfetta stabilizzazione della tensione di uscita a causa del guadagno di anello non infinito del circuito di controreazione interno all'alimentatore; per un buon alimentatore R_0 è dell'ordine di un decina di milliohm e quindi la tensione ai capi del carico, che vale $V_L = E_0 - R_0 I_L \cong E_0$, è praticamente indipendente dalla corrente I_L erogata (per $I_L=1A$ si ha una riduzione $E_0 - V_L \cong 10mV$).

Quando però il carico assorbe una notevole corrente, anche se R_0 è piccola, la riduzione della tensione V_L può non essere più accettabile e soprattutto varia se la corrente erogata varia.

Se inoltre il carico è posto a grande distanza dai morsetti dell'alimentatore (vedi figura 8a), la resistenza $2R_S$ del filo di collegamento tra l'alimentatore ed il carico si pone in serie a R_0 e $V_L = E_0 - (R_0 + 2R_S)I_L$. La tensione V_L varia in misura maggiore al variare

della corrente erogata e tutto funziona come se l'alimentatore avesse una resistenza equivalente pari a R_0+2R_S .

In questo caso, per migliorare le cose, si realizza un particolare alimentatore fornito di 4 morsetti: 2 corrispondono ai morsetti tradizionali di uscita dai quali viene erogata la tensione e la corrente sul carico, mentre i due supplementari hanno la funzione di "SENSE" della tensione V_L che si vuole stabilizzare e vanno collegati direttamente ai capi del carico (nodi tra i quali si vuole mantenere la tensione costante). L'alimentatore utilizza infatti questa tensione come grandezza da controreazionare e quindi da stabilizzare.

La figura 8b mostra i collegamenti corretti che permettono di neutralizzare l'effetto delle resistenze R_S , mantenendo più stabile la tensione ai capi di R_L .

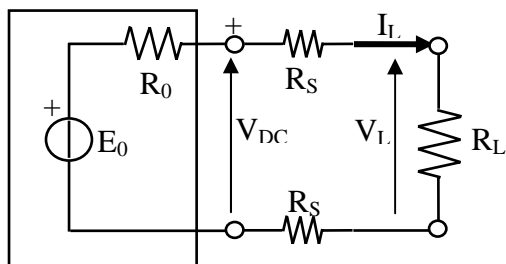


Fig. 8a

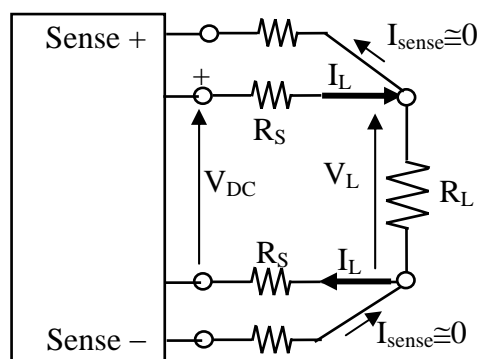


Fig. 8b

4 – Misure della resistenza di uscita in regime di carico resistivo

L'esercitazione consiste nell'eseguire la misurazione della resistenza equivalente di uscita R_0 di un alimentatore, che, come si è accennato, modella l'effetto della riduzione della tensione di uscita in condizioni di carico resistivo.

Per individuare il processo di misurazione più adatto, occorre fare un modello del sistema in misura che evidentemente è riconducibile al circuito equivalente di Thévenin riportato nella figura 9a, a cui corrisponde una caratteristica elettrica riportata in figura 9b.

La misura di R_0 si riconduce a stimare la pendenza di tale caratteristica.

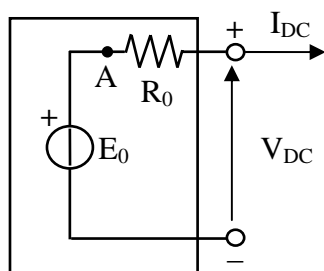


fig. 9a

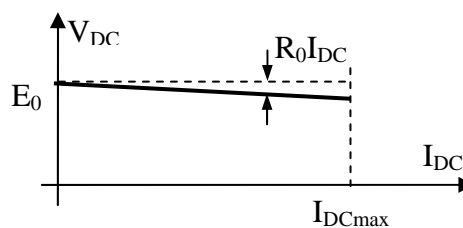


fig. 9b

Si tenga presente che il valore di R_0 è molto piccolo (o.d.g. decina di milliohm) a cui corrisponde una caratteristica pressoché orizzontale e che normalmente non si richiede un'accuratezza di misura elevata, ma ci si accontenta dell'ordine del 10%.

Occorre notare che:

- trattandosi di una resistenza equivalente di uscita secondo Thévenin, R_0 non è un resistore fisicamente presente in serie all'uscita dell'alimentatore;
- il resistore ha il morsetto (A) non direttamente accessibile ad un eventuale strumento di misura,
- non è pensabile porre $E_0=0$ (cortocircuitare cioè il generatore ideale) e misurare R_0 con tecnica volt-amperometrica iniettando corrente dai morsetti di uscita: infatti per imporre $E_0=0$ occorre spegnere l'alimentatore e di conseguenza svanisce l'effetto di R_0 .

4.1 Primo metodo di misura

Sulla base delle considerazioni fatte, la pendenza della caratteristica di figura 9b, nell'ipotesi sufficientemente valida che questa sia lineare, può essere misurata rilevando la tensione e la corrente di uscita per due situazioni di carico imposto R_{L1} e R_{L2} .

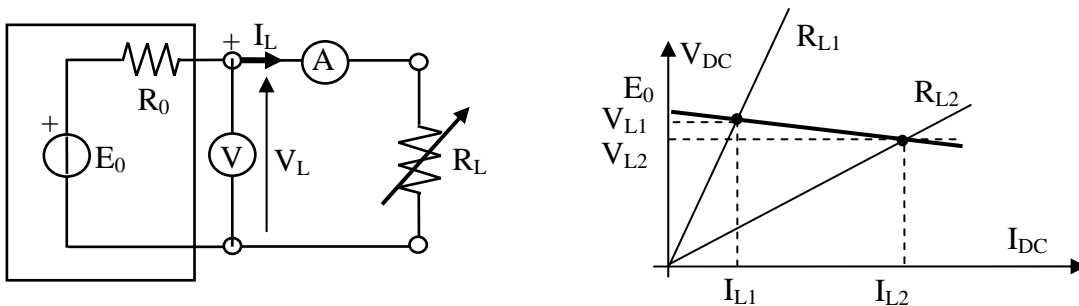


Fig. 10

Riferendosi alla figura 10, siano V_{L1} e V_{L2} le tensioni¹ e I_{L1} e I_{L2} le correnti corrispondenti alle due condizioni di carico, si può facilmente ricavare:

$$V_{L1} = E_0 - R_0 I_{L1}$$

$$V_{L2} = E_0 - R_0 I_{L2}$$

Da cui si ricava indirettamente il valore di R_0

$$R_0 = \frac{V_{L1} - V_{L2}}{I_{L2} - I_{L1}} \quad (1)$$

Essendo R_0 molto piccola (caratteristica quasi orizzontale), risulta $V_{L1} \cong V_{L2}$ e quindi si presume che la differenza al numeratore della (1) possa essere misurata con scarsa accuratezza, infatti la incertezza relativa di misura, stimata nel caso peggiore vale:

$$\left| \frac{\delta R_0}{R_0} \right| = \left| \frac{\delta(V_{L1} - V_{L2})}{(V_{L1} - V_{L2})} \right| + \left| \frac{\delta(I_{L2} - I_{L1})}{I_{L2} - I_{L1}} \right| = \left| \frac{\delta(V_{L1})}{(V_{L1} - V_{L2})} \right| + \left| \frac{\delta(V_{L2})}{(V_{L1} - V_{L2})} \right| + \left| \frac{\delta(I_{L2})}{(I_{L2} - I_{L1})} \right| + \left| \frac{\delta(I_{L1})}{(I_{L2} - I_{L1})} \right|$$

I primi due termini dell'incertezza possono assumere valori molto elevati per il fatto che $(V_{L1} - V_{L2}) \rightarrow 0$.

¹ Si noti che il voltmetro va inserito direttamente sui morsetti dell'alimentatore, perché se fosse messo a valle dell'amperometro si misurerebbe $R_0 + R_G$ dove R_G è la resistenza dell'amperometro.

Utilizzando la procedura di misura schematizzata nella figura 10, per limitare l'incertezza occorre avere un voltmetro con risoluzione molto elevata, così da apprezzare le differenze di tensione in modo più significativo (con conseguente miglioramento dell'accuratezza).

A titolo di esempio numerico si ipotizzino i seguenti valori:

$$E_0=10V, R_0=10 \text{ m}\Omega, I_{L1}=0, I_{L2}=1A,$$

si misurerà con un voltmetro numerico a 4+1/2 cifre $V_{L1}=10,000V, V_{L2}=9,990V$.

Nell'ipotesi che l'incertezza assoluta di misura della tensione sia ottimisticamente pari alla risoluzione, cioè $\delta V_{L1}=\delta V_{L2}=1mV$ e l'incertezza assoluta nella misura della corrente sia $\delta I_{L2}=0,01A$ (infatti $I_{L1}=0$ per definizione) si ottiene:

$$\left| \frac{\delta R_0}{R_0} \right| = \left| \frac{1 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} \right| + \left| \frac{1 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} \right| + \left| \frac{1 \times 10^{-2}}{1} \right| = 0,21 = 21\% \quad (2)$$

che appare eccessiva, anche se sono stati utilizzati strumenti di buona qualità.

Per migliorare l'accuratezza di un ordine di grandezza bisogna utilizzare un voltmetro numerico con almeno una cifra in più, così da leggere $V_{L1}=10,0000V, V_{L2}=9,9900V$ con risoluzione $\delta V_{L1}=\delta V_{L2}=0,1mV$.

In tal caso, nell'ipotesi che l'accuratezza delle misure di tensione sia pari alla risoluzione, si ha:

$$\left| \frac{\delta R_0}{R_0} \right| = \left| \frac{1 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-3}} \right| + \left| \frac{1 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-3}} \right| + \left| \frac{1 \times 10^{-2}}{1} \right| = 0,03 = 3\%$$

Un miglioramento nella procedura si ha se una delle condizioni di carico è quella di far lavorare l'alimentatore a vuoto, come nello schema di figura 11, cosicché $I_{L1}=0$ e $\delta I_{L1}=0$.

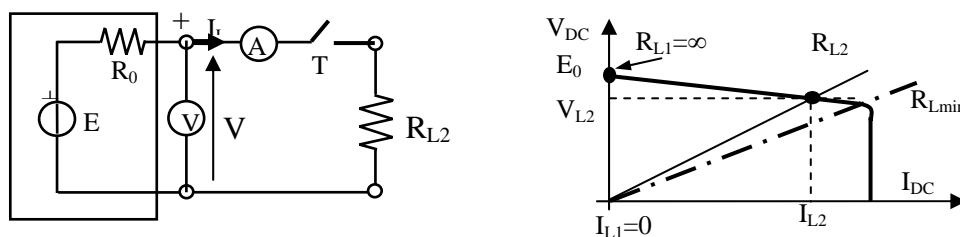


Fig. 11

In pratica verrà adottata questa tecnica.

Nella prima fase con l'interruttore T aperto si misura

$$V_{L1}=E_0$$

Si chiude l'interruttore sul carico R_{L2} (occorre che $R_{L2} > R_{Lmin}$) e si misura

$$V_{L2}=E_0-R_0I_{L2}$$

Da cui si ricava

$$R_0 = \frac{E_0 - V_{L2}}{I_{L2}} \quad (3)$$

Che comunque contiene ancora al numeratore una differenza piccola tra due grandezze elevate, con i problemi di incertezza di misura già analizzati.

4.2 Secondo metodo di misura: tecnica differenziale

Un'alternativa alla procedura precedente che consente di ottenere incertezze dello stesso ordine di grandezza è quella di misurare in maniera diretta la differenza $E_0 - V_{L2}$ che compare al numeratore della relazione (3).

Per fare ciò occorre adottare lo schema della figura 12 dove si esegue una misura differenziale creando un offset di tensione mediante un alimentatore ausiliario di riferimento (ALR).

Lo schema adottato per la seconda prova è il seguente:

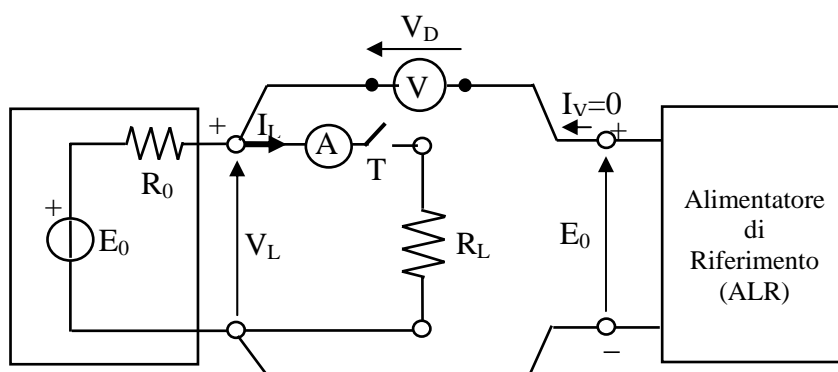


Fig. 12

La misurazione avviene in due fasi:

1 Fase

Con l'interruttore T aperto l'alimentatore in prova lavora a vuoto e pertanto

$$V_{L1} = E_0, \quad I_{L1} = 0;$$

in queste condizioni si regola la tensione di uscita dell'alimentatore di riferimento al valore E_0 (il voltmetro V indicherà idealmente $V_{D1} = 0$).

2 Fase

Si chiude l'interruttore T e in tale condizione si ha

$$V_{L2} = E_0 - R_0 I_{L2} = V_{D2} + E_0 \quad \text{da cui}$$

$$V_{D2} = R_0 I_{L2} \quad (4)$$

$$R_0 = V_{D2} / I_{L2} \quad (5)$$

La misura diretta della corrente I_{L2} e della tensione V_{D2} permette di ricavare indirettamente il valore di R_0 .

In queste condizioni l'incertezza di misura vale

$$\left| \frac{\delta R_0}{R_0} \right| = \left| \frac{\delta(V_{D2})}{(V_{D2})} \right| + \left| \frac{\delta(I_{L2})}{(I_{L2})} \right| \quad (6)$$

Rispetto alla tecnica descritta nel paragrafo 4.1 si possono fare le seguenti considerazioni:

- il voltmetro misura la caduta di tensione dovuta alla resistenza interna dell'alimentatore (riferendosi all'esempio numerico si avrebbe $V_{D2}=10\text{mV}$) e quindi occorre un voltmetro numerico che abbia portate di questo ordine di grandezza (10mV, 100 mV), anche se il numero di cifre è limitato, per non avere incertezze di misura troppo elevate;
- occorre che l'alimentatore ALR fornisca una tensione stabile nelle due fasi di misura (si tenga presente che ALR lavora comunque sempre a vuoto a causa della resistenza idealmente infinita del voltmetro e quindi questa condizione si può ottenere con una certa facilità);
- la condizione di azzeramento, con interruttore aperto, potrebbe essere difficile da ottenere per la presenza sia di tensioni di rumore su entrambi gli alimentatori, sia per la limitata sensibilità di regolazione di ALR.

Nel caso che non si riesca ad ottenere $V_{D1}=0$ la relazione che definisce R_0 diventa

$$R_0 = \frac{V_{D2} - V_{D1}}{I_{L2}} \quad (7)$$

Dove V_{D1} è la tensione residua minima che si riesce ad ottenere con l'interruttore T aperto, dopo avere cercato di regolare l'uscita di ALR al valore E_0 .

In questo caso però la differenza che compare al numeratore della (7) è ottenuta tra due valori in cui $V_{D2} \gg V_{D1}$ e quindi si migliora l'accuratezza di misura.

4.3 Analisi delle ulteriori sorgenti di errore

Effetti delle resistenze di contatto

Dato il piccolo valore della resistenza da misurare, occorre nella realizzazione pratica della misurazione tenere presente l'esistenza delle resistenze di contatto e quelle dei fili dei collegamenti.

In particolare riferendosi allo schema di figura 11 queste resistenze parassite si possono localizzare sui morsetti dell'alimentatore. La configurazione corretta per eliminare questi effetti è mostrata in figura 13. Il voltmetro deve essere inserito a monte delle resistenze R_A per evitare di misurare anche $2R_A$ in serie con la R_0 . Le resistenze R_V dei collegamenti voltmetrici invece non hanno effetto, poiché la corrente assorbita dal voltmetro è trascurabile e pertanto lo è anche la caduta di tensione sulle R_V .

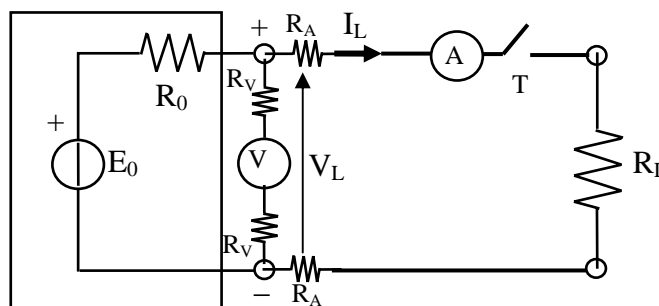


Fig. 13

Dal punto di vista pratico si possono realizzare le connessioni come nella figura 14

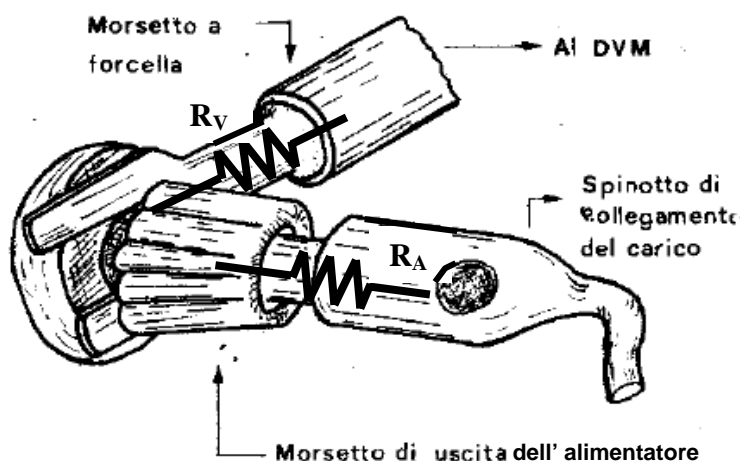


Fig. 14

La resistenza R_A è infatti localizzata essenzialmente nella connessione spinotto-boccola e il morsetto a forcetta preleva la tensione a monte di tale resistenza.

Anche nel secondo schema di misura (figura 12) le resistenze di contatto si comportano in modo simile e bisogna eliminarne l'effetto creando morsetti voltmetrici ed amperometrici (figura 15)

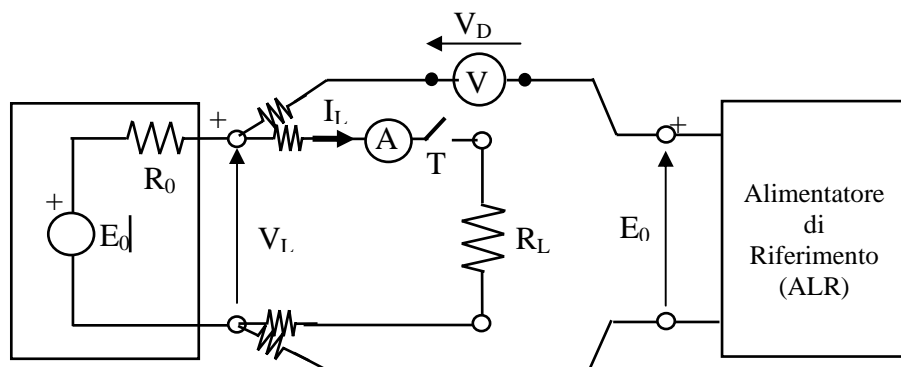


Fig. 15

4 – Misure della resistenza di uscita in regime con carico impulsato

La terza prova che si propone di fare è quella di caratterizzare l'impedenza di uscita dell'alimentatore in condizioni di corrente di carico impulsata².

Per carico impulsato si intende un carico che assorbe una corrente impulsiva che varia da valore $I_{L1}=0$ a valore $I_{L2} \ll I_{Lmax}$.

² Questa è la situazione che si verifica quando si alimentano circuiti digitali che attivano e spengono carichi resistivi.

Si tratta di sollecitare l'alimentatore nelle condizioni mostrate sulla caratteristica di uscita di figura 16 in condizioni dinamiche, inserendo un carico con un interruttore controllato elettronicamente con un'onda quadra. Si commuta così la corrente I_u dal valore 0 al valore $I_{L2}=E_0/R_{L2}$

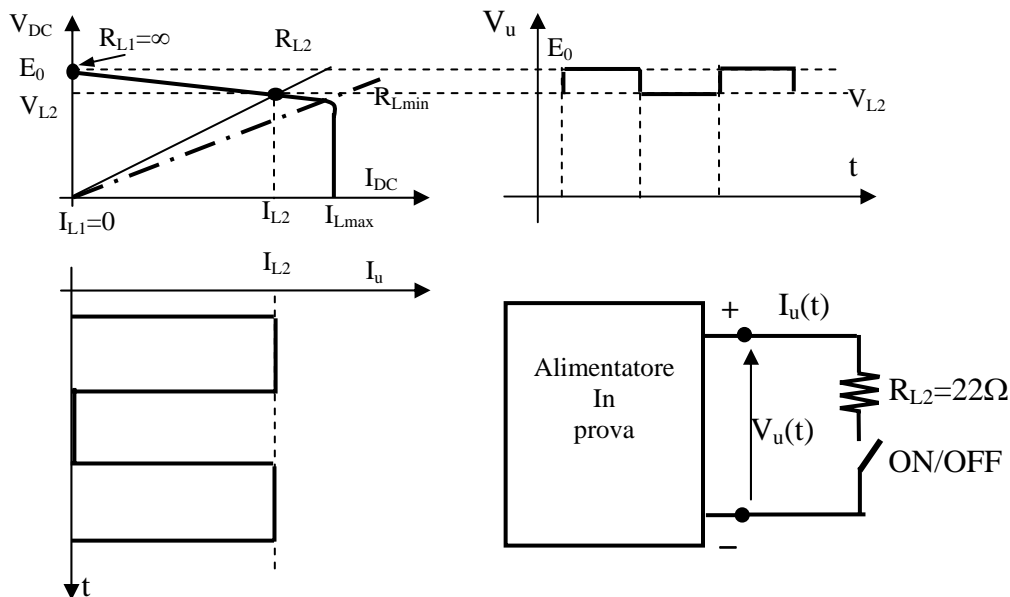


Fig.16

E' stato realizzato allo scopo un circuito montato su una basetta che ha lo schema all'interno del riquadro tratteggiato di figura 17.

Il circuito viene alimentato da un'onda quadra di ampiezza sufficiente a far commutare il transistore dall'interdizione alla saturazione, con un comportamento simile ad un interruttore ON/OFF. Con l'interruttore chiuso l'alimentatore è caricato con $R_{L2}=22\Omega$ (verificare che la corrente erogata $I_{L2}=E_0/R_{L2}$ sia inferiore alla I_{Lmax}), e ovviamente con l'interruttore aperto lavora a vuoto.

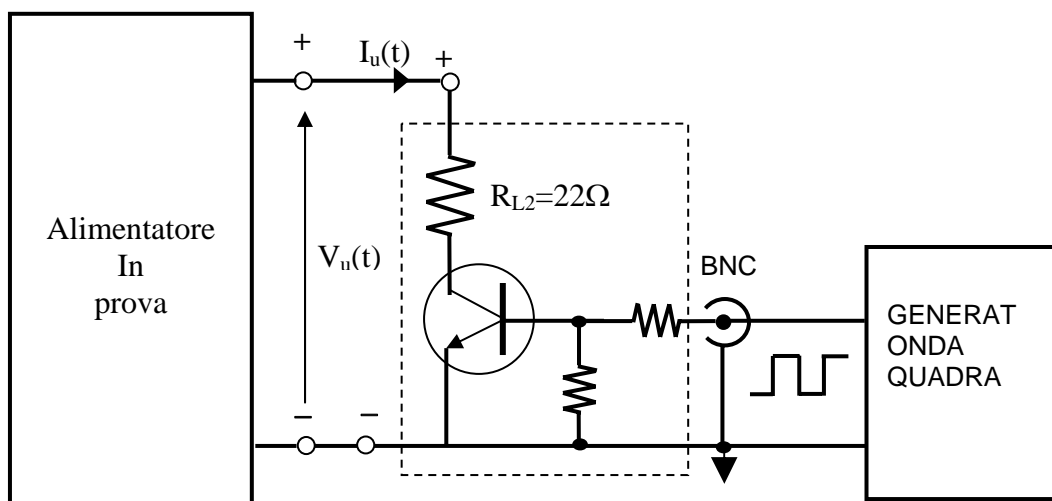


Fig. 17

Collegando un oscilloscopio direttamente ai morsetti di uscita dell'alimentatore, idealmente si dovrebbe osservare l'andamento della tensione V_u (attenzione al morsetto di massa) secondo quando indicato in figura 16.

Il valore picco-picco dell'onda quadra in linea di principio vale:

$$V_{pp} = E_0 - V_{L2} = R_0 I_{L2}$$

e quindi da una misura della tensione V_{pp} e della corrente I_{L2} (nota per calcolo o meglio misurata con il transistor in saturazione), si potrebbe anche risalire al valore di R_0 ricavato questa volta con un metodo dinamico.

In realtà la f.d.o. di tensione non è un'onda quadra ma presenta un andamento dei transistori di commutazione che possono essere diversi a seconda dell'alimentatore ma in generale sono del tipo di figura 18 (in cui per motivi grafici è stata esaltata la variazione di V_u).

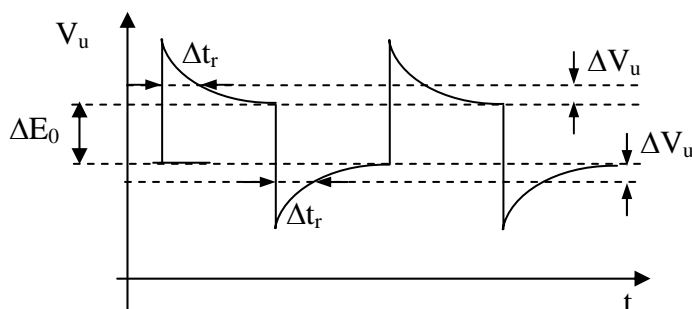


Fig. 18

Sull'andamento di questa tensione si può misurare Δt_r detto "recovery time", o tempo di riassetto, che è il tempo impiegato dalla tensione di uscita a rientrare entro una fascia ΔV_u simmetricamente definita dai due valori tratteggiati.

Questo tempo dà informazioni sulla rapidità di risposta dell'alimentatore a ripristinare il valore impostato di tensione quando il carico richiede correnti di tipo impulsivo.

Dalla f.d.o. di figura 18 si può ricavare anche l'informazione sulla resistenza di uscita misurata in condizioni dinamiche: infatti la differenza di tensione ΔE_0 tra i valori asintotici di V_u vale

$$\Delta E_0 = R_0 I_{L2} \quad R_0 = \Delta E_0 / I_{L2}$$

Il valore di R_0 misurato con questa prova può differire dai precedenti, misurati in condizioni statiche, per effetto delle diverse condizioni termiche a cui lavorano gli stadi di uscita dell'alimentatore.