

Analisi della risposta ai transitori

Chester Simpson
Power Manager Apps
National Semiconductor

*Una guida ragionata
alla comprensione dei transitori
e alcuni suggerimenti per ottimizzare
prestazioni e costi dei sistemi*

Con il termine transitorio si identifica un fenomeno che si manifesta per un breve periodo di tempo. La capacità di un regolatore di tensione di mantenere la sua tensione di uscita all'interno di un intervallo specifico quando si verifica una variazione transitoria nella corrente di carico è divenuto un problema di primaria importanza nel momento in cui sono aumentate le velocità di funzionamento dei microprocessori e le richieste in termini di corrente. Le specifiche relative a un sistema di alimentazione per Cpu possono richiedere tensioni di alimentazione che rimangano nello stato stazionario nonostante il manifestarsi di variazioni delle correnti di carico di 20 o 30 A nel giro di poche centinaia di nanosecondi. Il conseguimento di tali risultati non è assolutamente banale. La risposta ai fenomeni transitori è uno degli aspetti di più difficile comprensione che riguardano la regolazione della tensione nei sistemi elettronici. Uno dei miti da sfatare, ad esempio, è rappresentato dal fatto che i regolatori a elevata velocità non richiedono condensatori. Al contrario, la presenza di condensatori è sempre necessaria qualora si verifichino transitori di carico, indipendentemente dalla velocità del regolatore.

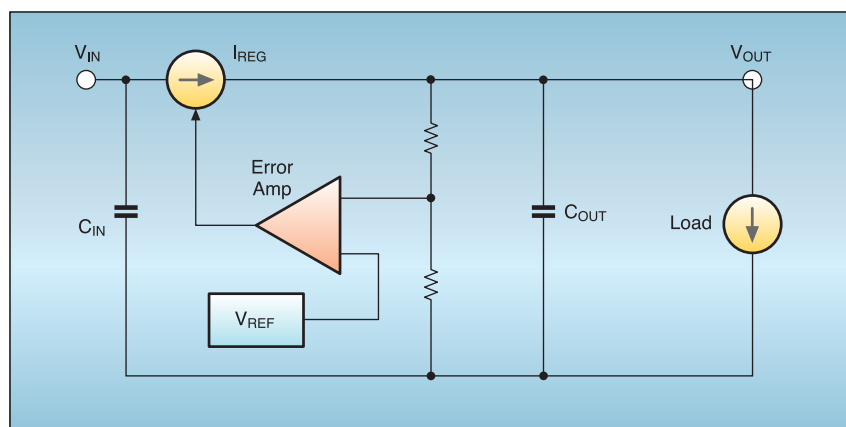


Fig. 1 – Schema di un tipico regolatore di tensione

Un fattore di basilare importanza è comprendere esattamente cos'è un transitorio e come opera per valutare dove è necessario investire per aumentare le prestazioni del sistema e dove invece risparmiare senza penalizzare le prestazioni stesse.

Regolazione della tensione

La quasi totalità dei circuiti elettronici richiede un'alimentazione costante che deve essere mantenuta all'interno di un intervallo di tolleranza specifico per assicurare le prestazioni desiderate (una Cpu è in grado di supportare una deviazione massima pari a $\pm 3\%$ del valore nominale). Questo valore fisso di tensione viene fornito da un regolatore di tensione (Fig. 1).

La tensione di uscita viene rilevata attraverso un partitore resistivo mentre un amplificatore di errore regola costantemente il generatore di corrente per mantenere l'uscita al valore della tensione nominale. Il regolatore di tensione deve essere in grado di mantenere costante la tensione di uscita quando la richiesta di corrente da parte del carico varia da zero al valore di pieno carico (che può essere anche superiore a 20 A).

Questa risulta un'operazione semplice finché la richiesta di corrente da parte del carico variano lentamente. Nel momento in cui tale richiesta subisca una brusca impennata, il regolatore non sarà in grado di garantire una tensione di uscita perfettamente stazionaria.

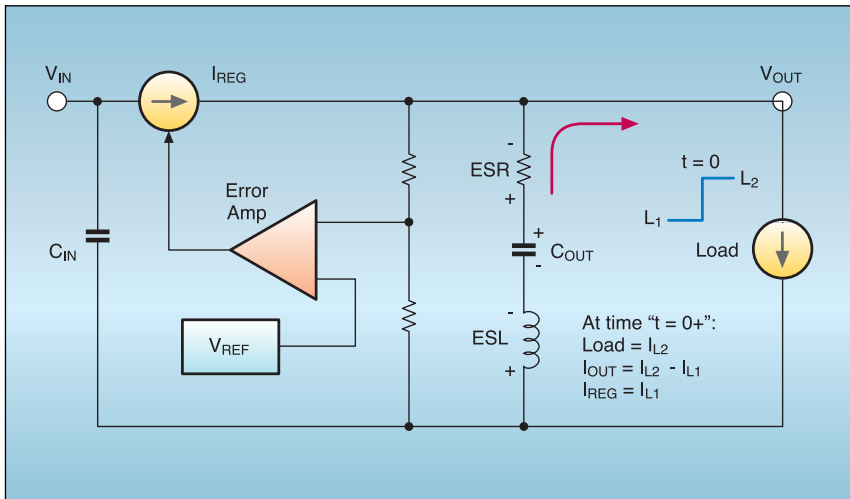


Fig. 2 – Transitorio di carico in cui la corrente passa a un valore superiore

Per una piena comprensione dei transitori di carico è necessario tenere conto dei seguenti fattori:

- 1) Un regolatore di tensione agisce alla stregua di un generatore di corrente controllato in tensione che pilota il carico (il generatore di corrente viene regolato dalla retroazione della tensione proveniente dall'uscita). Il generatore di corrente del regolatore non può variare istantaneamente il suo comportamento, quindi se la velocità della variazione della corrente di carico è superiore a quella della risposta del regolatore, la tensione di uscita varierà.
- 2) Durante l'intervallo di tempo nel quale l'anello di controllo del regolatore è occupato a regolare le variazioni del carico, il solo componente capace di fornire la differenza di corrente di carico (ovvero tra il valore nello stato stazionario e quello nuovo della corrente di carico) è il condensatore di uscita. Quindi è necessaria la presenza di condensatori di uscita per cercare di mantenere la tensione di uscita costante durante i transitori di carico e le specifiche relative al sistema permettono di determinare il numero e il tipo di condensatori che devono essere usati.
- 3) Un regolatore operante ad alta velocità è sempre la scelta migliore. Maggiore è la velocità di risposta dell'anello di controllo, minore sarà la variazione della tensione del condensatore di uscita prima che l'anello regoli il

fenomeno transitorio. Quindi, con un regolatore più veloce è possibile mantenere il medesimo intervallo di tolleranza di regolazione del carico utilizzando una capacità di uscita inferiore (il che comporta una riduzione dei costi).

Transitorio di carico

Al fine di esaminare le modalità operative di un transitorio di carico, si analizza ora un esempio in cui il fenomeno transitorio si verifica quando la corrente di carico passa da I_{L1} a un valore più alto (I_{L2}) in un tempo praticamente nullo (Fig. 2). Prima che si verifichi il transitorio, il regolatore si trova in uno stato stazionario, per cui $I_{REG} = I_{L1}$ e il condensatore di uscita non fornisce corrente al circuito esterno.

Il generatore di corrente del regolatore (I_{REG}) non può variare la sua erogazione istantaneamente, quindi al tempo $t = 0+$ (ovvero nell'istante successivo all'incremento al valore I_{L2}), si avrà $I_{REG} = I_{L1}$. Mediante una semplice analisi ai nodi, il condensatore di uscita deve erogare una corrente pari a:

$$I_{COUT} = I_{L2} - I_{L1}$$

Il condensatore C_{OUT} continuerà a erogare corrente fino al momento in cui l'anello di controllo farà aumentare I_{REG} fino a raggiungere il valore I_{L2} . Nel periodo di tempo in cui C_{OUT} deve erogare

corrente, la tensione ai suoi capi diminuisce poiché il dispositivo si scarica. La tensione ai capi di C_{OUT} diminuisce anche a causa delle cadute di tensione che si verificano ai capi dell'induttanza equivalente serie (ESL) e della resistenza equivalente serie (ESR) interne del condensatore, come evidenziato in figura 2.

Risposta al transitorio della tensione di uscita

Come accennato appena sopra, in tutti i condensatori sono presenti la resistenza equivalente serie e l'induttanza equivalente serie che influenzano in maniera significativa la risposta al transitorio. La tensione di uscita che si manifesta durante un transitorio di carico dovuto a un aumento della corrente ha un andamento simile a quello riportato in figura 3.

L'induttanza equivalente serie (ESL) provoca una caduta di tensione ai suoi capi che dipende dal tempo di salita del transitorio di carico: più veloce sarà la variazione di carico, più elevato sarà il guizzo (spike) di ESL sulla forma d'onda della tensione di uscita. Lo spike si verifica in un tempo estremamente breve, poiché l'induttanza genera una tensione in risposta a una variazione di corrente, come descritto dalla seguente relazione:

$$V = L \, di/dt$$

Nel momento in cui la corrente di carico raggiunge il nuovo valore (I_{L1}), lo spike di tensione imputabile alla resistenza equivalente serie (ESL) sarà terminato. L'induttanza assumerà un ruolo sempre più critico in funzione della rapidità del tempo di salita del transitorio della corrente di carico.

I condensatori ceramici di elevato valore sono caratterizzati da valori estre-

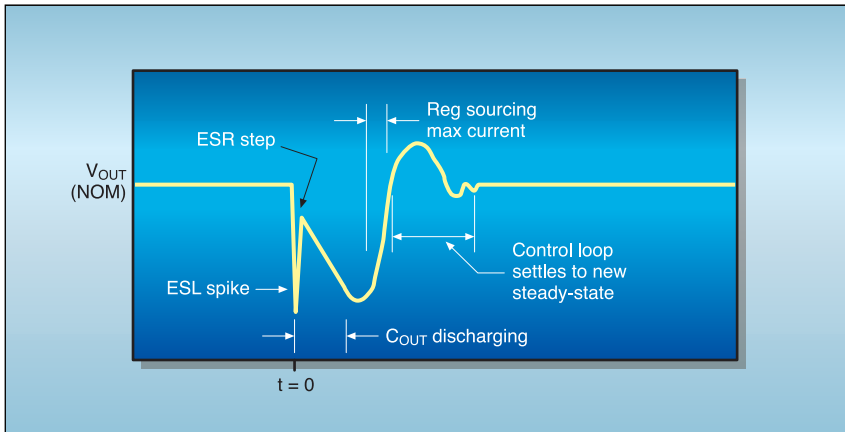


Fig. 3 – Andamento della tensione di uscita dopo un incremento a gradino della corrente di carico

mamente bassi di ESR e ESL, per cui vengono utilizzati nei terminali dei dispositivi in cui vi sono i transistori di carico sono caratterizzati da una salita molto veloce.

La resistenza equivalente serie del condensatore di uscita provoca una caduta di tensione ogni volta che il condensatore assorbe o eroga corrente (nella forma d'onda di Fig. 3 viene segnalato come gradino ESR). È importante sottolineare il fatto che il gradino ESR è una variazione della tensione continua nell'uscita regolata durante un transitorio di carico. Quindi la resistenza equivalente serie diventa un parametro critico quando si deve valutare la "finestra di tolleranza di tensione" massima della tensione regolata.

Durante l'intervallo di tempo precedente alla regolazione della sorgente di corrente del regolatore al nuovo valore da parte dell'anello di controllo, la tensione di uscita diminuisce a causa della caduta di tensione che si verifica ai capi di ESR (come pure della quantità imputabile alla scarica di C_{OUT} nel medesimo intervallo di tempo).

Poiché la tensione di uscita regolata è scesa al di sotto del valore nominale a causa degli effetti descritti, la retroazione relativa all'amplificatore di errore farà in modo da costringere a far funzionare a pieno regime il generatore di corrente I_{REG} in modo da forzare l'uscita ad assumere il valore della ten-

sione nominale. L'uscita aumenterà oltre il valore nominale, poi verrà corretta in quanto l'anello continuerà a svolgere la propria azione. Il comportamento dell'anello in questa situazione rispecchia il margine di fase (stabilità dell'anello).

Con un anello compensato in maniera adeguata, caratterizzato da un margine di fase superiore a 40° , il fenomeno transitorio si estinguerà rapidamente con una sola escursione di ampie dimensioni, come riportato in figura 3. La forma d'onda rappresentata fa riferimento a uno scenario "nel caso migliore" per quel che concerne la stabilità e non può definirsi una situazione tipica. Quando l'anello di controllo raggiunge la nuova condizione di stato stazionario (dove cioè il regolatore fornisce

una corrente pari a I_{L2}), il condensatore di uscita non fornisce corrente al circuito.

Asimmetria dei transistori di carico

Esistono due tipi di transistori di carico: la corrente di carico può aumentare rapidamente, oppure può diminuire. Nell'esempio precedente è stato mostrato in che modo varia la tensione di uscita quando la corrente di carico aumenta bruscamente. Nell'esempio seguente (Fig. 4) si esamina il comportamento nel caso opposto. In questo caso la corrente di carico passa da I_{L1} a un valore più basso (I_{L2}). Poiché I_{REG} non è in grado di ridurre istantaneamente il valore di corrente, essa continuerà in un primo momento a erogare una corrente pari a I_{L1} .

Poiché in questo caso il carico assorbe una corrente inferiore, il condensatore di uscita deve a sua volta assorbire la differenza tra I_{L1} e I_{L2} , per cui si assisterà a un aumento della tensione ai capi di C_{OUT} .

Se la corrente di carico diminuisce in modo rapido, genererà uno spike di tensione ai capi di ESL e la corrente che fluisce in C_{OUT} che passa attraverso ESR provocherà una brusca variazione di ESR (Fig. 5). Dopo lo spike, la tensione ai capi di C_{OUT} aumenterà nel momento in cui il condensatore si carica assorbendo la corrente ($I_{L1} - I_{L2}$). Poiché il valore di V_{OUT} è aumentata

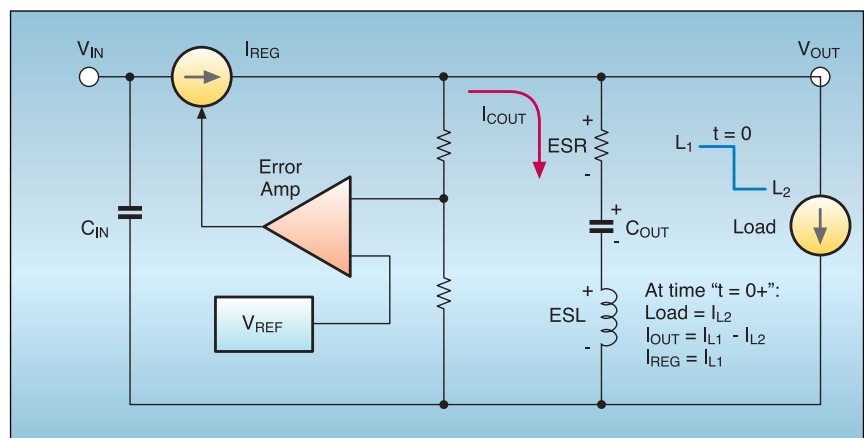


Fig. 4 – Transitorio di carico in cui la corrente di carico passa a un valore inferiore

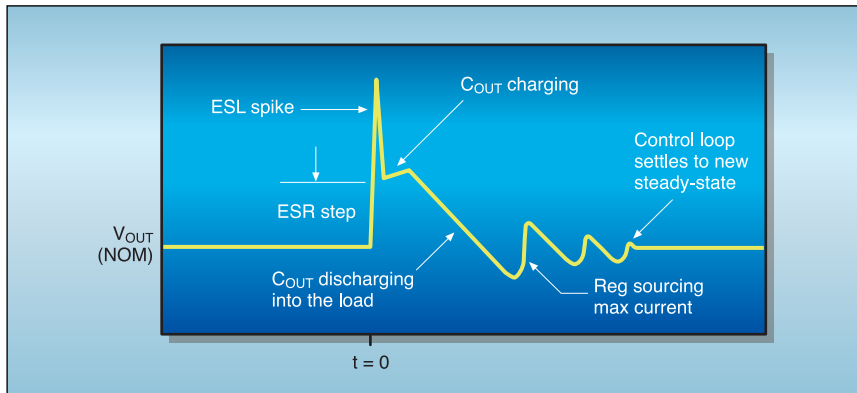


Fig. 5 - Andamento della tensione di uscita dopo un brusco abbassamento del valore di carico

rispetto al valore nominale, la retroazione farà in modo che il loop di controllo sospenda (o perlomeno riduca) l'erogazione da parte del generatore di corrente I_{REG} . Poiché la maggioranza dei regolatori di tensione non può assorbire corrente alle loro uscite, V_{OUT} può solamente scendere al valore nominale alla medesima velocità con la quale C_{OUT} può scaricarsi nel carico. Una volta che V_{OUT} scende al di sotto del suo valore nominale, il loop di controllo attiverà in maniera brusca I_{REG} che quindi produrrà una brusca variazione dell'uscita, causando una ripetizione del ciclo finché non verrà raggiunta la nuova condizione di stato stazionario e la corrente attraverso C_{OUT} diventerà pari a zero in quanto I_{REG} sarà uguale a I_L .

La ragione per la quale un transitorio in cui diminuisce la corrente nel carico impiega più tempo per assestarsi (ovvero riportarsi in uno stato stabile) rispetto a uno in cui vi è un incremento della corrente di carico è imputabile al fatto che nel primo caso C_{OUT} richiede più tempo per scaricare la tensione in eccesso nel carico: poiché la richiesta di corrente di carico diminuisce, la scarica sarà più lenta. Ciò significa che in molti casi un transitorio che prevede una variazione dal 20% all'80% della corrente nominale sarà caratterizzato da un assestamento dell'uscita al valore nominale più rapido rispetto a un transitorio in cui avviene il passaggio inverso (ovvero una variazione del valore della corrente di carico nominale dall'80% al 20%). Anche se la variazione della corrente di carico risulta uguale, i

tempi di assestamento (e l'andamento delle forme d'onda) si discosteranno notevolmente.

Ottimizzare la risposta al transitorio

Per ottenere una risposta ottimizzata al transitorio è necessario tenere conto di alcuni fattori, sintetizzati di seguito:

1) I migliori condensatori per ridurre i fenomeni transitori sono quelli ceramici a elevato valore di capacità.

In parecchi progetti di schede madri è prevista la presenza di parecchi condensatori ceramici (di capacità che arriva a 22 μ F) montati direttamente sui pin degli integrati del dispositivo che deve essere alimentato per garantire la soppressione dei fenomeni transitori. I condensatori ceramici di elevata capacità sono caratterizzati da valori di ESR dell'ordine di alcuni milliOhm e da valori altrettanto bassi di ESL. Non esistono altri tipi di condensatori capaci di assicurare questo livello di prestazioni per quel che concerne sia ESR sia ESL (anche se sono disponibili condensatori elettrolitici caratterizzati da bassissimi valori di ESR);

2) È buona norma rendere disponibile un "serbatoio" di carica attiguo. Esiste un limite pratico della capacità che può essere fornita dai condensatori ceramici, per cui questi ultimi vengono supportati da condensatori elettrolitici posti nelle immediate vicinanze che forniscono anche supporto al carico una volta superata la variazione iniziale del transitorio. Per questo scopo è possibile utilizzare condensatori al tantalio, anche se ora sono caduti in disuso

a causa delle problematiche legate a questioni di sicurezza. I dispositivi Oscon e Poscap di Sanyo e SP di Panasonic sono esempi di condensatori elettrolitici di elevata capacità con bassissimi valori di ESR.

3) Molto spesso si utilizzano condensatori elettrolitici di grande capacità e basso costo con elevato ESR agli ingressi del regolatore di tensione. La ragione per cui condensatori a ESR più elevato possono essere posizionati all'ingresso è dovuto al fatto che il gradino di tensione prodotta dalla resistenza equivalente serie non influenza direttamente la tensione di uscita regolata, piuttosto è ridotto dalla capacità di regolazione di linea del regolatore che tipicamente fornisce un'attenuazione compresa tra 60 e 80 dB della variazione in continua all'ingresso del regolatore.

4) I regolatori di tensione caratterizzati da un'ampiezza di banda d'anello più estesa permetteranno di regolare le variazioni del carico più velocemente, riducendo nel contempo la quantità totale di capacità richiesta. In linea generale i regolatori lineari sono solitamente più veloci rispetto ai regolatori a commutazione poiché i primi sono contraddistinti da ampiezze di banda a guadagno unitario ben superiori a 500 kHz (sebbene vi è da considerare il fatto che le richieste di elevate correnti di carico da parte di parecchi processori della nuova generazione richiedono l'impiego di convertitori a commutazione a causa dei vincoli imposti in termini di dissipazione di potenza). Quindi la maggiore velocità comporta, come sempre, un costo maggiore e l'incremento dell'ampiezza di banda dei regolatori ad elevata corrente non rappresenta un'eccezione. \square

National Semiconductor
readerservice.it n. 8