

Anatomia di un microcontrollore “low power”

Mike Salas
director of marketing
microcontrollers
Silicon Labs

Un'analisi dettagliata dei principali fattori da tenere in considerazione per una corretta analisi dell'efficienza energetica di una MCU

Il risparmio energetico ha riflessi favorevoli non solo dal punto di vista ambientale, ma anche da quello economico. I numerosi vantaggi legati al miglioramento dell'efficienza energetica sono ampiamente documentati: bolletta elettrica più “leggera” per i consumatori, diminuzione del carico sulle “utilities”, abbattimento dei costi di possesso per i prodotti elettronici e riduzione del numero di batterie esaurite che vengono gettate nelle discariche.

A causa della crescente pervasività dei dispositivi elettronici, la diminuzione dei consumi di potenza deve iniziare dai semiconduttori. Le tecniche di risparmio energetico sviluppate a livello di chip hanno sicuramente un impatto di notevole entità. Questo è vero in special modo per i microcontrollori (MCU), che rappresentano l'engine “intelligente” che si cela dietro la maggior parte degli odierni dispositivi elettronici.

Dal punto di vista dell'architettura di sistema, il problema legato all'identificazione delle MCU che si possono realmente definire “low power” (ovvero a basso consumo) costringe i progettisti a destreggiarsi tra una miriade di informazioni fatte dai diversi protagonisti che operano in questo mercato. A causa dei differenti (e spesso confusi) metodi di valutazione adottati dai diversi produtto-

ri, non si tratta di un problema di facile soluzione.

Di seguito si vogliono esaminare i principali fattori da tenere in considerazione nel momento in cui si vuole analizzare l'efficienza energetica delle varie MCU presenti sul mercato.

Il consumo di potenza di una MCU si può definire come la somma dei seguenti contributi:

Potenza totale consumata =
= potenza consumata
in modalità attiva +
+ potenza consumata
in standby (sleep)

Un altro importante parametro da tenere in considerazione è il periodo di tempo

richiesto dalla MCU per passare dallo stato di standby allo stato attivo. Poiché la MCU non può effettuare nessun tipo di elaborazione utile fino al momento in cui tutti i componenti – sia analogici sia digitali - non sono completamente assestati (ovvero in uno stato stabile) e operativi, è importante aggiungere questa potenza (che risulta quindi sprecata) nell'equazione precedente (Fig. 1), che si modifica nel modo seguente:

Potenza totale consumata =
= potenza consumata
in modalità attiva +
+ potenza consumata
in standby (sleep) +
+ potenza consumata nella fase
di wake-up

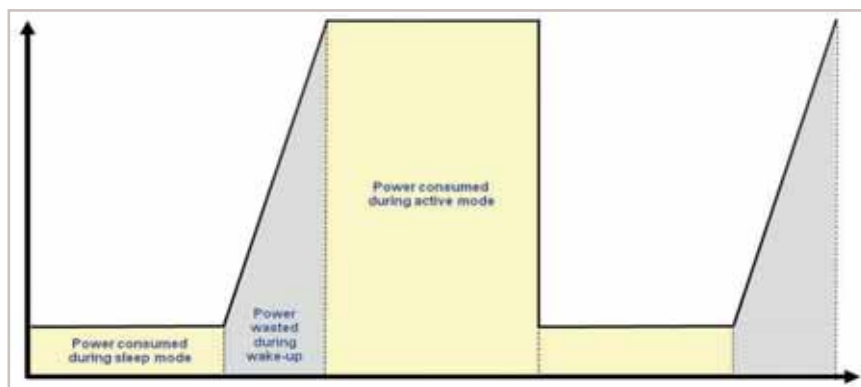


Fig. 1 – La potenza totale dissipata è dovuta ai tre contributi riportati in figura

Poiché ogni applicazione ha una propria specificità, i progettisti di sistemi tendono a privilegiare alcuni elementi a scapito di altri. Alcuni dispositivi, come ad esempio i contatori dell'acqua, trascorrono gran parte del loro tempo in standby: i duty cycle estremamente lunghi impongono che il consumo di potenza in questa modalità operativa debba essere il minore possibile. I datalogger, dal canto loro, entrano ed escono frequentemente dallo stato attivo, per cui è opportuno limitare i tempi di wake up. Un produttore che voglia sviluppare una MCU realmente innovativa non deve cercare di individuare quali di questi parametri sia il più importante, bensì progettare una soluzione a partire da zero in grado di minimizzare i consumi imputabile a ogni fattore presente nell'equazione appena sopra definita. Per raggiungere questo obiettivo è necessario disporre di un know how di prim'ordine nelle tecnologie a segnali misti al fine di risolvere i complessi problemi a livello sia architetturale sia circuitale legati alla minimizzazione dei consumi nei domini analogico e digitale. Un'analisi di ciascuna di queste variabili è senz'altro utile per individuare quali sono le problematiche che i progettisti di sistemi devono conoscere in modo da poter scegliere la MCU più adatta alla loro applicazione.

Corrente in modalità attiva

Nel caso di una porta logica CMOS, il consumo di potenza dinamica è descritto dalla seguente equazione:

$$\text{Potenza in modalità attiva} = C \cdot V^2 \cdot f$$

dove C è la capacità di carico, V è la tensione di alimentazione e f è la frequenza di commutazione.

Il termine che si riferisce alla capacità è funzione del progetto e della tecnologia di processo utilizzata, mentre il termine relativo alla frequenza è funzione dei requisiti di elaborazione della specifica applicazione. Osservando questa equa-

zione, balza immediatamente all'occhio il notevole impatto della tensione di alimentazione sulla potenza complessiva consumata dalla MCU. Di conseguenza, l'aggiunta della regolazione di tensione al progetto di una MCU contribuisce in maniera significativa al risparmio energetico in quanto viene garantita una tensione di alimentazione costante di valore inferiore al circuito della MCU. I convertitori a commutazione potrebbero rappresentare una possibile soluzione, anche se risultano più adatti laddove sono previsti rapporti di conversione di tensione molto ampi.

Nelle applicazioni alimentate a batteria, dove il rapporto di conversione di tensione è ridotto (all'incirca 1:1 alla fine della vita della batteria), una soluzione migliore potrebbe essere rappresentata dall'aggiunta a bordo del chip di un regolatore di tensione lineare (LDO - Low Drop Out) in quanto capace di assicurare un livello di efficienza accettabile a fronte di una riduzione sia della complessità sia dei costi rispetto a una soluzione a commutazione.

Per illustrare i vantaggi legati all'uso di un regolatore LDO, è utile riprendere in considerazione l'equazione della potenza dinamica consumata da una porta CMOS:

$$\begin{aligned} \text{Potenza in modalità attiva} &= \\ &= C \cdot V^2 \cdot f = V \cdot (C \cdot V \cdot f) = \\ &= V \cdot I \quad (\text{dove } I \text{ è la corrente} \\ &\quad \text{dinamica, pari a } C \cdot V \cdot f) \end{aligned}$$

È prassi comune normalizzare la corrente dinamica alla frequenza di 1 MHz e a un determinato valore della tensione di alimentazione. Per esempio, una MCU a bassissima dissipazione di recente introduzione è caratterizzata da un consumo di corrente dinamica di 160 mA per MHz a 1,8 V.

In assenza di regolazione dell'alimentazione, questo valore potrebbe aumentare a $(160) \cdot (3,2/1,8) = 284$ mA per MHz nel momento in cui la tensione di ali-

mentazione risulta pari a 3,2 V. Con un LDO, la corrente della batteria rimarrà costante a 160 mA per MHz sull'intero intervallo di alimentazione (Fig. 2).

Come si può vedere, questa architettura di potenza avanzata può essere usata per mantenere una corrente attiva costante sull'intero intervallo di tensione operativa e permettere al progettista di conseguire significativi risparmi in termini di consumi di potenza. Dal punto di vista del progettista di sistemi, è importante determinare il consumo di corrente della MCU quando essa opera sull'intero intervallo di tensione operativa - e non solo quando la tensione di funzionamento è pari a 1,8 V, valore questo dichiarato da molti costruttori di MCU. Quando si dichiara un valore di corrente eccessivamente ottimistico che non prenda in considerazione il valore tipico della tensione di alimentazione, si ottengono informazioni che non rispecchiano il reale comportamento dell'applicazione. Per esempio, nelle applicazioni che prevedono 2 batterie a bottone e AA/AAA, le batterie stesse operano molto spesso a tensione prossima a quella iniziale di 3 V, ragion per cui la specifica a 1,8 V può trarre in inganno: in questa applicazione, infatti, parecchie CPU consumeranno una potenza superiore di circa il 50% rispetto ai valori comunemente riportati.

Inoltre, poiché il consumo di potenza risulta direttamente proporzionale alla frequenza di commutazione, è importante per i progettisti di sistemi normalizzare i valori di corrente riportati riferendoli alla frequenza (corrente/MHz). Combinando questi due fattori è possibile eseguire un confronto corretto delle MCU basate sul seguente parametro di valutazione:

Consumo di corrente/MHz a 3V

Alcuni produttori cercheranno di creare

una certa confusione identificando il termine MHz con la velocità di clock del sistema, mentre il valore significativo è la velocità di clock delle istruzioni. Ciò potrebbe essere fonte di malintesi: le velocità di clock del sistema possono essere maggiori di un fattore pari a 2 (o superiore) rispetto alla effettiva velocità di esecuzione delle istruzioni, con conseguente raddoppio (minimo) del consumo di potenza effettivo. Risulta quindi importante accertarsi che tutto venga normalizzato alla velocità di clock delle

possibile per il tempo più ridotto possibile, in modo che il dispositivo possa scorrere quanto più tempo possibile in modalità sleep a bassissimo consumo. In alcune applicazioni, la corrente in sleep mode è il parametro che concorre in misura maggiore al consumo di energia complessivo. Ciò che spesso viene trascurato è il fatto che il valore minimo assoluto di una MCU in modalità sleep è limitato principalmente dalla corrente di dispersione (leakage current). Per esempio, un dispositivo con 20 ingressi

tura inferiori per ridurre la corrente in modalità attiva, ma ciò si traduce in un incremento delle correnti di dispersione. Una soluzione a questo problema potrebbe essere rappresentata dall'utilizzo delle competenze maturate nel campo delle tecnologie a segnali misti per realizzare un'unità per la gestione della potenza (PMU - Power Management Unit) avanzata esplicitamente ideata per limitare le correnti di dispersione e garantire un consumo di corrente ridottissimo in modalità sleep indipendentemente dalla tecnologia di processo utilizzata. Quando si utilizzano tecnologie inferiori o uguali a 0,25 μm , per minimizzare la corrente in sleep mode è necessario ridurre la potenza del core digitale. I moduli che operano in sleep mode, come i circuiti per la gestione della potenza, le celle delle piazzole (pad) di I/O e l'RTC, devono operare a partire da una tensione di alimentazione non regolata in modo da evitare ulteriori consumi imputabili alla presenza di un LDO.

La riduzione della potenza del core digitale impedisce che la dispersione nello stato di off possa contribuire alla corrente in sleep mode: in ogni caso la MCU deve conservare i contenuti della RAM e lo stato di tutti i registri durante la modalità sleep in modo tale che l'esecuzione del codice possa ripartire dal punto esatto precedente allo stato di off. Per questa operazione di "mantenimento" è possibile ricorrere a schemi di polarizzazione che permettono di garantire una corrente molto bassa in sleep mode oppure ad appositi latch in grado di preservare lo stato nella modalità sleep senza dar luogo a dispersioni significative. La MCU richiede anche un monitoraggio continuo della tensione di alimentazione (ovvero un circuito per il rilevamento di fenomeni di brownout - cali di tensione) in modo da resettare il dispositivo nel caso il valore della tensione di alimentazione scenda al di sotto del valore di mantenimento minimo,

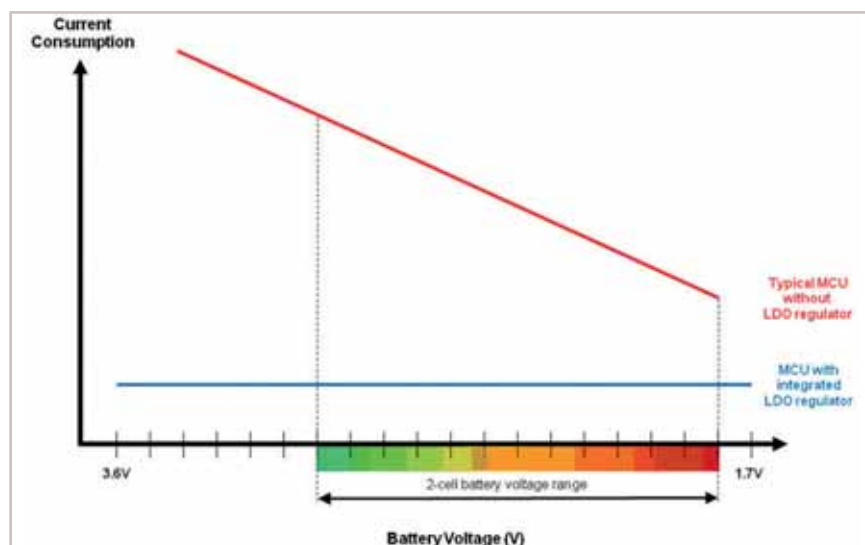


Fig. 2 – Il ricorso a un LDO permette di mantenere costante la corrente della batteria sull'intero intervallo di alimentazione

istruzioni. Tenendo conto di tutte queste considerazioni e utilizzando un valore di tensione di alimentazione tipico, è possibile dedurre correttamente il consumo di corrente effettivo in modalità attiva.

Consumo di corrente in standby (sleep)

Il conseguimento della massima efficienza energetica (o della durata della batteria) significa accertarsi che ciascun compito (task) svolto dalla MCU consumi la minore quantità di corrente possibile al valore di tensione minimo

caratterizzato da specifiche di 100 nA per quel che concerne la corrente di dispersione di ingresso può consumare fino a 2 mA in sleep mode.

La corrente di dispersione è imputabile a diversi fattori, il più importante dei quali è senza dubbio la tecnologia di processo impiegata. In alcuni casi i costruttori decidono di utilizzare un processo da 0,25 o 0,35 μm per ridurre la corrente di sleep imputabile alla dispersione, ma una scelta di questo tipo comporta un aumento della corrente attiva. In altri casi, i produttori ricorrono a geometrie da 0,18 μm o addirittura

evento questo che potrebbe provocare alterazioni dello stato. Dal punto di vista dei progettisti di sistemi, è importante esaminare le specifiche relative alla corrente di dispersione in modo da poter identificare i fornitori di CPU che hanno sfruttato il know how acquisito nel settore delle tecnologie a segnali misti per risolvere questo complesso problema. I progettisti devono anche tener conto del fatto che molti produttori mettono a disposizione numerose opzioni per quanto concerne la corrente di standby. Parecchi fornitori tendono a sottolineare il bassissimo valore di corrente consumata in modalità sleep, che spesso corrisponde alla corrente consumata quando l'RTC e il circuito per il rilevamento del brownout sono disabilitati. Altri produttori invece si spingono oltre e riportano una corrente in modalità shutdown, la quale non prevede il mantenimento dei contenuti in memoria e richiede un reset per il wake-up. Di conseguenza, il dato non risulta particolarmente significativo. Poiché in molte applicazioni è richiesto il mantenimento dei contenuti della memoria e dei registri, è importante che il progettista di sistemi effettui confronti nelle seguenti condizioni operative:

- corrente in stand-by/sleep mode con RTC e circuito di brownout disabilitati (con mantenimento dei dati nella RAM);
- corrente in stand-by/sleep mode con RTC disabilitato e circuito di brownout abilitato;

- corrente in stand-by/sleep mode con RTC e circuito di brownout abilitati.

Un progettista di sistemi può dunque utilizzare i valori corretti quando calcola la potenza complessiva dissipata in modalità standby sulla base del duty cycle dell'applicazione considerata.

Energia consumata della fase di wake-up

Come discusso in precedenza, nei sistemi che utilizzano le modalità sleep una quantità significativa di potenza può

essere sprecata nelle fasi di risveglio della MCU e di predisposizione alle operazioni di acquisizione o di elaborazione dei dati. In talune applicazioni una MCU può utilizzare una maggiore potenza per l'uscita dallo stato di standby rispetto a quella richiesta durante l'elaborazione dei dati. Di conseguenza è importante sviluppare una MCU in grado di svegliarsi e stabilizzarsi in tempi estremamente brevi al fine di minimizzare l'intervallo di tempo in cui si trova in stati in cui si spreca energia.

Una MCU dovrebbe essere in grado di uscire dalla modalità di sleep mediante un evento di trigger esterno o un timer interno. La fonte di wake-up periodica più flessibile è senza dubbio rappresentata da un RTC che può essere fatto funzionare mediante un oscillatore a cristallo esterno (nel caso l'applicazione richieda una temporizzazione molto precisa) o da un oscillatore interno a bassa frequenza (laddove è necessaria una minore accuratezza). Ovviamente è meglio evitare l'uso di un oscillatore ad avviamento lento in presenza di clock di sistema molto veloci: in questo caso è meglio ricorrere a un oscillatore on-chip ad avviamento rapido.

Poiché per molti dispositivi è previsto un risveglio su base periodica al fine di effettuare il campionamento di un segnale di ingresso mediante il convertitore A/D presente a bordo del chip, è importante prevedere un tempo sufficiente per il risveglio della porzione digitale e l'assestamento di quella analogica, condizioni fondamentali per iniziare a effettuare misure valide. Il comportamento in fase di start-up dei moduli analogici può avere un impatto rilevante sull'intervallo di tempo speso in modalità attiva: l'assestamento dei riferimenti o dei regolatori di tensione che utilizzano condensatori di disaccoppiamento esterni può richiedere alcuni millisecondi. A volte i costruttori di MCU riportano solo i tempi di wake-up per il circuito digitale, trascurando il tempo necessario per l'as-

sestamento dei circuiti analogici. Di conseguenza, è importante per un progettista di sistemi analizzare i tempi complessivi di wake-up e di assestamento per i circuiti sia analogici sia digitali per valutare in modo corretto la quantità di energia sprecata.

Altre considerazioni

Per ridurre la potenza dissipata in un sistema esistono anche altri metodi. Per esempio spesso sono impiegate configurazioni che prevedono 2 batterie AA/AAA in virtù del fatto che un gran numero di CPU può operare solo fino a 1,8 V e in alcuni casi con funzionalità ridotte (inattività del convertitore A/D e velocità del clock delle istruzioni ridotta). Un metodo innovativo per ridurre i consumi (e quindi l'impatto ambientale) prevede di convertire il progetto in modo da dar vita a una configurazione che utilizza una sola batteria, la quale può essere fatta sempre funzionare sempre fino alla fine della vita utile (0,9 V). Per poter realizzare una simile configurazione, la MCU deve integrare un convertitore c.c./c.c. ottimizzato che deve essere fatto funzionare al valore di tensione utile più basso, pari a 0,9 V nel caso dei dispositivi alcalini. Questo approccio consente all'utente e/o al fornitore di risparmiare il costo di una batteria.

Un altro metodo per ridurre i consumi è l'utilizzo di MCU a elevato grado di integrazione che includono convertitori A/D e D/A e altre periferiche: alla MCU può essere demandato il controllo delle operazioni di abilitazione e disabilitazione di queste periferiche in base alle necessità dell'applicazione considerata. Alcune MCU, per esempio, dispongono di un convertitore A/D a basso consumo operante in modalità burst che può effettuare misure analogiche mentre la CPU è nello stato di off al fine di diminuire ulteriormente i consumi.

readerservice@fieramilanoeditore.it