

IL caricabatterie a PLL

Laureando
Davide Moro

Relatore
Ch.mo Prof. Ing.
Leopoldo Rossetto

A.A. 2010-2011

Indice

Introduzione.....	5
Capitolo 1 – Le batterie agli ioni di litio.....	7
1.1 Generalità sulle batterie.....	7
1.2 Le batterie agli ioni di litio.....	9
1.3 La carica delle batterie agli ioni di litio	10
Capitolo 2 – Phase-Locked Loop	15
2.1 La struttura del PLL	15
2.2 Il rivelatore di fase	16
2.3 L'oscillatore controllato in tensione VCO	18
2.4 Il filtro passa basso.....	19
Capitolo 3 – Il sistema di caricabatterie a PLL.....	23
3.1 La scelta della struttura PLL per i caricabatterie	23
3.2 Il sistema di caricabatterie a PLL.....	26
3.3 Analisi matematica del sistema.....	33
3.4 Il prototipo di un caricabatterie a PLL.....	36
3.5 Le performance del sistema	41
Capitolo 4 – Il sistema di caricabatterie a PLL compensato	45
4.1 Il modello della batteria agli ioni di litio.....	45
4.2 La compensazione del sistema di caricabatterie a PLL	50
4.3 Il prototipo del caricabatterie a PLL compensato	52
4.4 Le performance del sistema compensato	54
Capitolo 5 – Il sistema di caricabatterie a PLL con carica impulsiva	59
5.1 Il processo di carica impulsivo.....	59
5.2 Il caricabatterie a PLL con carica impulsiva.....	60
5.3 Il prototipo del caricabatterie a PLL a corrente impulsiva	66
5.4 Considerazioni sulle performance.....	70
Conclusioni.....	75
Bibliografia:.....	77

Introduzione

Lo scopo della tesi è di fornire una presentazione generale sulle tecniche di carica delle batterie agli ioni di litio per poi procedere alla teorizzazione di un sistema di caricabatterie con struttura di controllo a PLL. Facendo quindi riferimento alla tecnica di carica a due fasi rispettivamente a corrente costante ed a tensione costante, di gran lunga la più utilizzata nelle applicazioni, appare infatti chiaro come vi siano notevoli analogie con gli stadi di aggancio di frequenza e di fase di un sistema PLL.

Si propone quindi un semplice sistema di carica per batterie agli ioni di litio con la struttura del controllo di carica a PLL per valutarne la funzionalità e le prestazioni. Di seguito, avvalorati pregi e difetti di tale sistema, si procede all'ottimizzazione del sistema tramite una tecnica di compensazione della resistenza interna del pacchetto batteria.

La tesi si conclude quindi con l'introduzione del concetto di processo di carica impulsivo e l'implementazione di tale strategia nell'architettura a PLL e la valutazione dei benefici apportati alla qualità di carica della batteria.

Capitolo 1

Le batterie agli ioni di litio

1.1 Generalità sulle batterie

Una batteria è un dispositivo che converte l'energia chimica contenuta nei materiali attivi direttamente in energia elettrica per mezzo di una reazione elettrochimica di ossido-riduzione (redox). Questa reazione induce il trasferimento di elettroni da un materiale all'altro attraverso un circuito elettrico. Nel caso di un sistema ricaricabile, la reazione di ossido-riduzione è reversibile e la batteria viene ricaricata attraverso un'inversione del processo.

Il termine batteria ha spesso una connotazione generale mentre nel dettaglio l'unità fondamentale è detta cella elettrochimica. La batterie è spesso costituita da una o più celle elettrochimiche connesse in maniera adeguata tramite dei collegamenti in serie o in parallelo.

La cella elettrochimica è costituita da tre componenti principali:

1. L'anodo, l'elettrodo negativo ovvero il riducente della reazione di ossido-riduzione, che viene ossidato durante la reazione elettrochimica e dona elettroni al circuito esterno.
2. Il catodo o elettrodo positivo è il materiale ossidante il quale assorbe gli elettroni dal circuito esterno e quindi procede a riduzione durante la reazione elettrochimica.

3. L'elettrolita, un conduttore ionico, che fornisce il mezzo per il trasferimento di carica, gli ioni, all'interno della cella tra anodo e catodo. L'elettrolita tipicamente è un liquido, come acqua o altri solventi, con l'aggiunta di sali alcalini o acidi al fine di impartire conducibilità ionica.

Nella scelta dei materiali, all'anodo è richiesta un'elevata efficienza come agente riduttore, un valore elevato di Coulomb in uscita (Ah / g) e una buona conducibilità oltre che ovviamente stabilità, facilità di fabbricazione e basso costo. Tale scelta ricade principalmente sui metalli. Lo zinco è stato a lungo il materiale più utilizzato per le sue proprietà favorevoli, mentre negli ultimi anni il Litio, il metallo più leggero, è diventato un anodo molto attraente per la sua compatibilità, leggerezza e duttilità.

Il catodo, al contrario, deve essere un efficace agente ossidante, deve essere stabile al contatto con gli elettroliti ed avere una congrua tensione di lavoro. Anche in questo caso, la scelta del materiale per il catodo ricade solitamente negli ossidi metallici.

L'elettrolita deve avere una buona conducibilità ionica, ma non essere elettronicamente conduttivo in quanto causerebbero un corto circuito interno. Inoltre non deve essere reattivo con i materiali degli elettrodi. Solitamente come elettroliti si utilizzano soluzioni acquose, ma nelle batterie al litio, ad esempio, viene utilizzato elettrolita solido a base di sale di litio e solventi organici per evitare la reazione del anodo con l'elettrolito.

Esistono in commercio differenti tipologie di batterie. Una prima sommaria classificazione distingue le batterie in primarie o secondarie, a seconda della loro capacità di essere ricaricate elettricamente. Le batterie primarie infatti non sono ricaricabili al contrario di quelle secondarie che si basano su una strategia ricaricabile.

Nel campo delle batterie secondarie la tipologia di batteria prende spesso il nome dai materiali utilizzati. Tra quelle di uso più comune ci sono sicuramente

le batterie al piombo-acido, quelle al Nichel-Cadmio, Nichel-Metallo idruro e quelle agli ioni di Litio.

1.2 Le batterie agli ioni di litio

Il litio è il più leggero tra tutti i metalli, offre il maggior potenziale elettrochimico e fornisce il valore più grande di energia specifica per peso. Le batterie ricaricabili utilizzando il litio metallico all'anodo teoricamente sarebbero delle batterie secondarie ottimali potendo fornire un elevatissimo valore di densità di energia. Purtroppo durante i cicli di carica e scarica di tali batterie si producono degli sgraditi detriti all'anodo i quali possono condurre alla rottura del separatore con conseguente corto circuito.

L'instabilità intrinseca del litio metallico, soprattutto durante la carica, ha spostato l'attenzione verso una soluzione non metallica che sfrutti gli ioni di litio. Lo ione di litio infatti, pur presentando una minor energia specifica rispetto al litio metallico, è molto più sicuro pur avendo la necessità di un controllo che garantisca il mantenimento di tensione e correnti ai livelli di sicurezza. L'energia specifica delle batterie agli ioni di litio è circa il doppio rispetto alle batterie NiCd ed anche l'elevata tensione nominale, mediamente 3.60 V, rappresenta un ulteriore vantaggio.

La batteria agli ioni di litio inoltre non presenta l'effetto memoria e non necessita di essere deliberatamente scaricata completamente. Anche il fenomeno di auto scarica è meno della metà rispetto ad esempio ai sistemi a base di nichel. Lavorando inoltre ad una tensione nominale media di circa 3.60 V per cella può essere utilizzata più frequentemente in singola cella, soprattutto nei dispositivi portatili, consentendo una semplificazione ed una conseguente riduzione dei costi. Gli svantaggi di tale tecnologia sono la necessità di un circuito di protezione per prevenire gli abusi ed un prezzo dei materiali piuttosto elevato.

La drastica riduzione dei costi di produzione avvenuta negli ultimi anni, assieme ad un progressivo miglioramento della densità di energia, rendono le batterie agli ioni di litio la più promettente e a più rapida crescita nel mercato. Nel 2009, ad esempio, le batterie agli ioni di litio rappresentano da sole il 38% dell'intero mercato globale.

La famiglia delle batterie agli ioni di litio si può dividere in tre principali tipi di batterie in funzione del tipo di ossido presente nel catodo che può essere cobalto, manganese e fosforo.

1.3 La carica delle batterie agli ioni di litio

Le prestazioni e la longevità delle batterie secondarie dipendono fondamentalmente dalla qualità del caricabatterie utilizzato. Esistono diverse strategie di carica utilizzabile per la ricarica delle batterie agli ioni di litio. La strategia più semplice, detta trickle charging, prevede di sottoporre la batteria ad corrente costante di lieve entità per un lungo periodo di tempo. Si tratta quindi di applicare una carica fissa a circa $0.1C$, ovvero ad un decimo della sua capacità, per tutto il tempo in cui la batteria è connessa in carica. Utilizzando tale strategia, la quale non necessita di un rilevatore di carica completa, la struttura del caricabatterie e del suo sistema di controllo è costituita da un circuito piuttosto essenziale il quale risulta di semplice realizzazione e di basso costo di produzione. Purtroppo le batterie agli ioni di litio non accettano di buon grado una sovraccarica e quindi una volta raggiunta la carica completa la corrente deve essere interrotta. La corrente costante trickle potrebbe infatti causare un rivestimento del litio metallico all'anodo mentre al catodo l'agente ossidante perde stabilità e produce anidride carbonica con conseguente aumento della pressione della cella. Tale situazione di conseguenza può compromettere la sicurezza della batteria arrivando anche a causare esplosioni e principi d'incendio. Un rivelatore di carica completa per utilizzare questo sistema di

carica della batteria sarebbe quindi comunque richiesto. Inoltre la strategia di carica a corrente costante trickle ha bisogno di lunghissimi tempi di carica, mediamente attorno alle 8 ore, ed è quindi indicata come una strategia di carica “overnight”. Uno dei requisiti inderogabili dei caricabatterie moderni è la velocità ed anche per questo motivo tale strategia risulta inutilizzabile nelle batterie agli ioni di litio.

Al fine quindi di ridurre in maniera significativa il tempo di ricarica, nella strategia di carica a corrente costante viene una quantità di corrente molto maggiore rispetto alla corrente di trickle utilizzata nel sistema precedente. Tale processo, seppure molto più rapido del precedente, ha bisogno per un funzionamento corretto e sicuro di un rilevatore dello stato di carica molto preciso al fine di evitare dei processi di sottocarica o di sovraccarica della batteria. Inoltre un buon rilevatore di carica non è sempre di semplice realizzazione.

Per queste motivazioni nelle batterie agli ioni di litio è sempre più diffuso il metodo di carica CC-CV ovvero diviso in due fasi principali distinte; la prima a corrente costante e la seconda fase a tensione costante (Constant Current - Constant Voltage CC-CV). Secondo questa strategia, in primo luogo viene applicata alla batteria una corrente costante che induce un innalzamento della tensione di batteria fino al raggiungimento di una tensione prestabilita, ovvero alla tensione nominale di batteria. Dopo aver raggiunto la tensione predefinita, tale tensione è mantenuta costante e la corrente di carica viene ridotta progressivamente. Quando la corrente di carica raggiunge lo zero, la batteria è completamente carica. In realtà il processo di carica non si arresta quando la corrente raggiunge lo zero ma al raggiungimento di un valore di corrente relativamente basso. Tale valore di corrente, detto corrente di cut off, è pari a circa il 3% della corrente nominale. Questa strategia di carica aumenta la velocità di carica delle batterie agli ioni di litio, il tempo totale del processo di

carica è di circa tre ore, ed in più permette di raggiungere lo stato di batteria carica completamente pur senza l'utilizzo di un rivelatore di carica.

Le differenti fasi della strategia di carica CC-CV sono rappresentate nella figura 1.1 dove viene riportato l'andamento della corrente e della tensione di carica della batteria. Si possono notare, delimitate temporalmente da una linea tratteggiata, le due distinte fasi di carica, la prima a corrente costante e la seconda a tensione costante. Di seguito inoltre si può notare la fase di carica denominata flottante in cui il processo di carica della batteria, per i motivi sopra elencati, viene interrotto. Solamente quando la tensione scende sotto una certa soglia, in seguito al normale utilizzo della batteria oppure al processo interno di auto scarica, il processo di carica riprende. Gli intervalli temporali di questo processo di carica flottante sono ovviamente molto più dilatati di quanto raffigurato in figura. La fase flottante è importante per mantenere sempre la batteria in uno stato di carica pressoché massimo evitando di mantenere una corrente di carica la quale, seppure di lieve intensità, stressa la batteria.

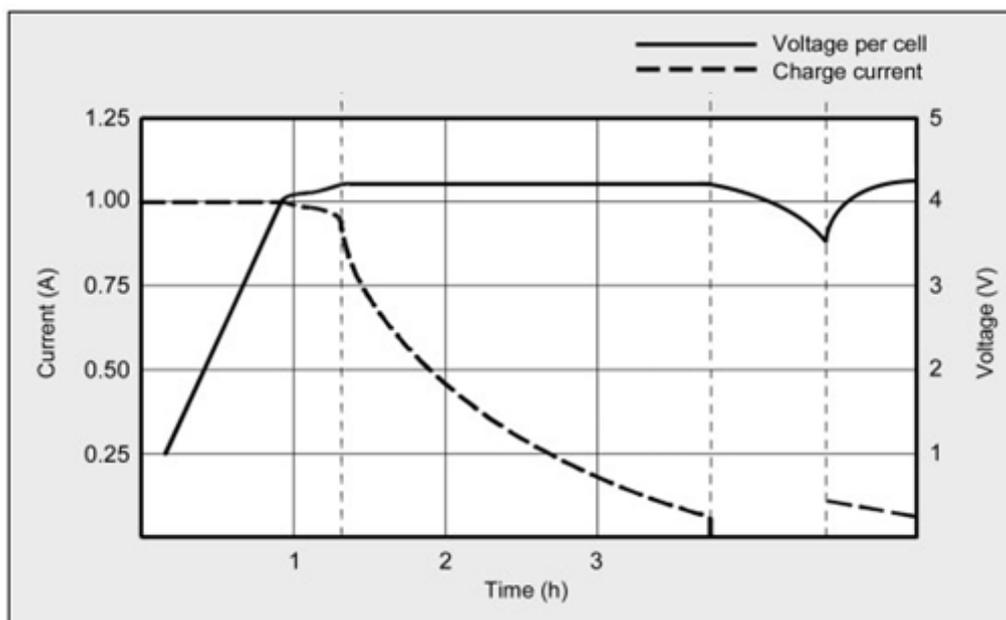


Figura 1.1 – Schema di carica di una batteria agli ioni di litio

Durante la prima fase a corrente costante, il tasso di carica tipico delle batterie agli ioni di litio è compreso in un range tra 0.5C e 1C. Tuttavia il tasso di carica consigliato è solitamente 0.7-0.8C.

Aumentando il valore della corrente di carica durante la prima fase, diminuendo così notevolmente il tempo in cui la tensione raggiunge il valore nominale, non si velocizza di molto il processo globale di carica poiché la seconda fase a tensione costante e a corrente variabile risulta conseguentemente più lunga. Il valore della corrente di carica applicata altera quindi il corrispettivo tempo delle due fasi senza avere un riscontro sostanziale sul tempo globale. Tuttavia una corrente di carica elevata permette di raggiungere velocemente una considerevole percentuale di carica suggerendo la possibilità di un ulteriore

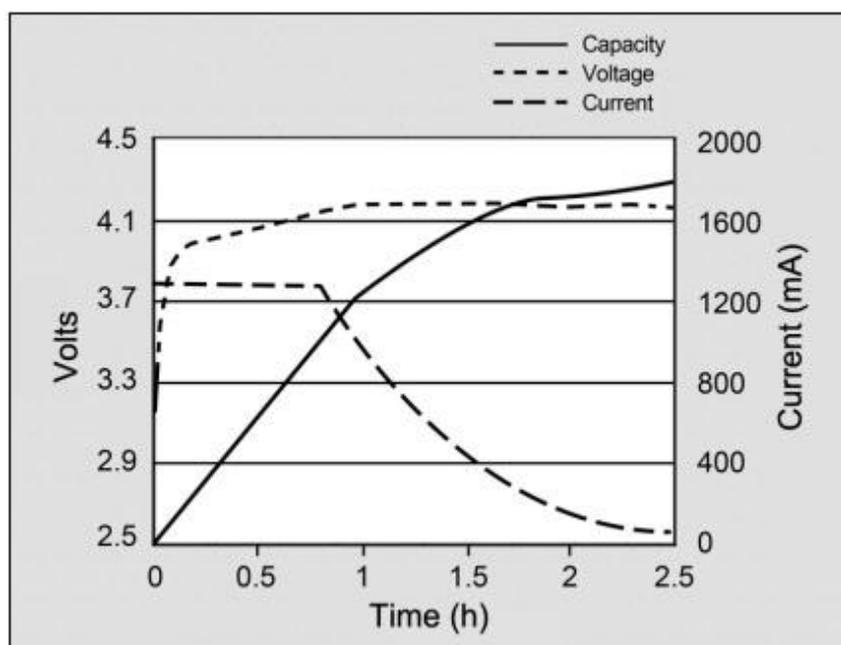


Figura 1.2 – La capacità in funzione della corrente e della tensione di carica nelle batterie agli ioni di litio

metodo di carica alternativo utilizzato da alcuni caricabatterie il quale permette di ricaricare la batteria in un ora o anche meno secondo una strategia definita “charge and run”. Come si può notare dalla figura 1.2 la capacità di carica aumenta rapidamente durante la prima fase di carica a corrente costante, raggiungendo anche valori pari all’85% in taluni casi, per poi crescere

lentamente fino al 100% durante la successiva fase a corrente variabile e tensione costante. Limitandosi a caricare la batteria utilizzando solamente la prima fase del processo di carica si raggiungono discreti valori di carica in un tempo relativamente molto breve.

A differenza di altri tipi di batterie, nelle celle agli ioni di litio si tollerano processi di sovraccarica della cella durante la carica poiché in pratica la cella agli ioni di litio prende solamente ciò che può assorbire e tutto quello che è extra diviene fonte di stress per la batteria. La maggior parte delle batterie lavorano a 4.20 V/cella con una tolleranza di +/- 50mV/cella. Tensioni maggiori potrebbero aumentare la capacità della batteria, ma l'effetto di ossidazione della cella ne riduce drasticamente il ciclo di vita.

La scelta di una tensione minore, così come evitare di caricare completamente la batteria, tende a stressare in maniera minore la batteria prolungando così il ciclo di vita della stessa a discapito delle performance di carica. A livello commerciale però solitamente si prediligono le performance di carica ed il miglioramento della capacità massima della batteria piuttosto che preservare il ciclo di vita della batteria.

Capitolo 2

Phase-Locked Loop

2.1 La struttura del PLL

Il Phase Locked Loop, in italiano detto anche circuito ad aggancio di fase, è un sistema a controreazione la cui struttura è composta essenzialmente da tre componenti: un rivelatore di fase, un filtro passa-basso ad un oscillatore controllato in tensione VCO. Nella figura 2.1 è rappresentata la struttura fondamentale di un circuito ad aggancio di fase in cui si possono riconoscere i tre blocchi funzionali distinti. Questa struttura è considerata la struttura fondamentale o essenziale in quanto può essere complicata o integrata con altri blocchi o funzioni a seconda delle numerose esigenze ed applicazioni pur mantenendo di base la medesima struttura. Il sistema, molto spesso indicato con l'acronimo PLL, ha in ingresso un segnale periodico di frequenza f_i il quale viene confrontato con il segnale retroazionato di frequenza f_o tramite il

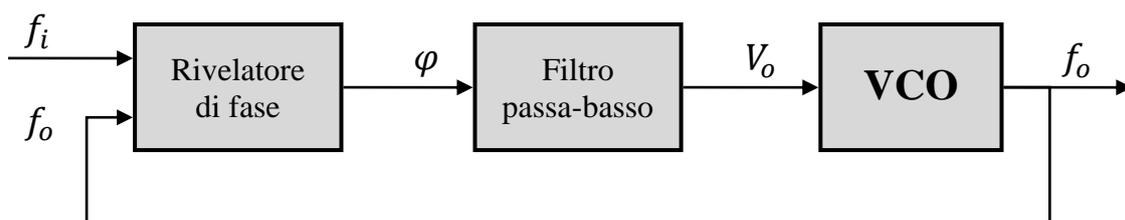


Figura 2.1 – Struttura fondamentale di un PLL

rivelatore di fase al fine di ottenere la differenza di fase tra i due segnali φ . Di seguito poi tale differenza di fase, attraverso una struttura del tipo di un filtro passa basso che elimina le componenti ad alta frequenza, genera la tensione V_o che va a pilotare l'ultimo blocco ovvero l'oscillatore controllato in tensione. Il VCO quindi oscilla generando il segnale di feedback di frequenza f_o che chiude la retroazione.

A regime, il sistema tenderà a raggiungere una configurazione in cui il segnale di feedback di frequenza f_o ovvero l'uscita del VCO e il segnale di riferimento f_i hanno la stessa frequenza e fasi sincrone, ottenendo così la perfetta sintonizzazione del PLL. Questa sintonizzazione avviene sostanzialmente in due step; nel primo step si raggiunge la sintonizzazione di frequenza mentre nel secondo la sincronizzazione delle fasi dei due segnali. La velocità di risposta del circuito dipende principalmente dalle caratteristiche del filtro oltre che dal comparatore di fase e dalla sensibilità del VCO.

2.2 Il rivelatore di fase

Il rivelatore di fase è un circuito che, ottenuti in ingresso due segnali periodici, è capace di fornire in uscita una tensione proporzionale alla differenza di fase dei due segnali.

Da un punto di vista matematico, ricevuti in ingresso i due segnali f_o e f_i il rivelatore di fase produce in uscita la differenza di fase tra i due segnali. Le pulsazioni di f_o e f_i sono rispettivamente $\omega_i = 2\pi \cdot f_i$ e $\omega_o = 2\pi \cdot f_o$ mentre le fasi si ottengono dalle seguenti relazioni:

$$\alpha_i = 2\pi \cdot \int f_i dt + \varphi_i \qquad \alpha_o = 2\pi \cdot \int f_o dt + \varphi_o$$

da cui l'errore di fase risultante si ottiene semplicemente:

$$\varphi = \alpha_i - \alpha_o$$

Il rivelatore di fase quindi funge da integratore dei due segnali in ingresso per farne poi la differenza al fine di calcolare la differenza tra le due fasi. L'uscita del blocco rivelatore è una tensione proporzionale a tale differenza di fase e quindi a seguito dell'integratore e della differenza ci sarà una funzione di trasferimento che trasforma la differenza nella tensione di uscita:

$$V_p = P(\varphi)$$

Tale funzione, che a priori non è lineare, può essere linearizzata ai piccoli segnali nell'intorno di un certo punto di lavoro ottenendo la relazione:

$$V_p = K_\varphi(\varphi + \varphi_o)$$

dove K_φ è la costante di proporzionalità e φ_o un eventuale valore di offset. La relazione può quindi essere riscritta in funzione di f_o e f_i nella forma:

$$V_p = K_\varphi \left(\frac{2\pi}{s} (f_i - f_o) + \varphi_o \right)$$

Il blocco del rivelatore di fase è quindi costituito da un blocco integratore, un sommatore che calcola la differenza di fase e un blocco K_φ che trasforma la differenza di fase nella tensione di uscita V_p .

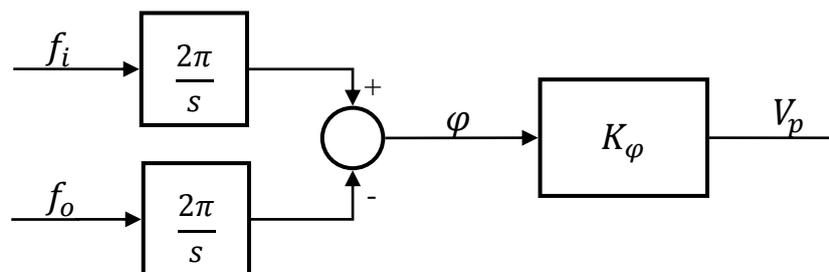


Figura 2.2 – Blocchi del rivelatore di fase

Esistono diverse tipologie di rivelatori di fase a seconda delle forme d'onda di lavoro e del metodo di rilevazione impiegato. In base a quest'ultima caratteristica si distinguono essenzialmente due categorie: i rivelatori a moltiplicazione e quelli a misura diretta dello sfasamento.

2.3 L'oscillatore controllato in tensione VCO

L'oscillatore controllato in tensione, frequentemente indicato con l'acronimo VCO – Voltage-Controlled Oscillator, è un dispositivo che genera in uscita un'oscillazione periodica, la cui frequenza viene determinata dal valore della tensione di controllo applicata all'ingresso. Esistono diverse tipologie di VCO che si distinguono tra loro principalmente per il tipo di forma d'onda prodotta oltre che per il campo di frequenze su cui lavorano, per il tipo di corrispondenza tra tensione e frequenza ed il grado di precisione del sistema.

Per l'utilizzo in un sistema Phase Locked Loop solitamente non è richiesto un elevato grado di precisione nella conversione tensione frequenza in quanto le imprecisioni non pregiudicano le performance del sistema, tuttavia sovente si preferisce che tale relazione di conversione sia lineare. Inoltre spesso si preferisce utilizzare VCO a medie prestazioni ma che si prestano ad essere integrati nello stesso monolitico in cui sono presenti anche le altre componenti del PLL al fine di avere un unico componente compatto.

Gli oscillatori controllati in tensione che generano forme d'onda sinusoidali sono composti solitamente da un amplificatore con un adeguato guadagno seguito da un circuito risonante poi retroazionato. Il circuito risonante solitamente è di tipo LC e, alle alte frequenze, si utilizzano dei diodi varactor per ottenere la capacità variabile del circuito risonante.

E' possibile inoltre ottenere delle sinusoidi anche a partire da VCO triangolari seguiti da un sistema di sagomatura del triangolo. I VCO triangolari sono infatti di semplice realizzazione e tramite un circuito a retroazione dotato di un integratore e di un commutatore. Con la stessa struttura si possono generare in uscita anche delle onde quadre.

Qualora si volesse un oscillatore molto preciso è anche possibile utilizzare un oscillatore a cristallo controllato in tensione che permette un'elevatissima precisione pur lavorando in un limitato range di frequenze.

Da un punto di vista matematico, per l'analisi dei vari blocchi del sistema a PLL, all'oscillatore controllato in tensione VCO è possibile associare una relazione che associ alla tensione di controllo V_o la frequenza di uscita f_o . Tale relazione può essere scritta mediante una relazione di proporzionalità con un fattore K_{vco} :

$$f_o = K_{vco}(V_o - V_r) + f_c$$

dove f_c è la frequenza di riposo che si verifica quando la tensione assume il valore iniziale V_r .

2.4 Il filtro passa basso

Il filtro passa basso del sistema Phase Locked Loop è la componente fondamentale che determina la stabilità e la velocità di risposta del sistema. Partendo dalle considerazioni sul blocco del rivelatore di fase e dell'oscillatore controllato in tensione effettuate nei paragrafi precedenti, si associa al blocco del filtro passa basso una generica funzione di trasferimento $F(s)$ al fine di valutare poi la stabilità del sistema in funzione di tale blocco.

Il guadagno a catena aperta del sistema a PLL è dato da:

$$G(s) = \frac{V_o}{f_i} = \frac{2\pi}{s} K_\varphi F(s)$$

mentre il guadagno della rete di retroazione risulta:

$$H(s) = \frac{V_o}{f_i} = K_{vco}$$

La funzione di trasferimento globale a catena chiusa può quindi essere scritta nella forma:

$$W(s) = \frac{V_o}{f_i} = \frac{\frac{2\pi}{s} K_\varphi F(s)}{1 + \frac{2\pi}{s} K_\varphi K_{vco} F(s)}$$

La scelta del filtro passa basso determina così la stabilità del sistema PLL.

Il filtro passa basso più semplice è quello con una sola costante di tempo e può essere rappresentato dalla funzione di trasferimento:

$$F(s) = A \frac{1}{1 + sT_p}$$

E di conseguenza il guadagno a catena aperta diventa:

$$GH(s) = \frac{2\pi}{s} K_\phi K_{vco} A \frac{1}{1 + sT_p}$$

In figura 2.3 lato sono rappresentati in alto i diagrammi asintotici dei tre blocchi del PLL e in basso il guadagno a catena aperta e la funzione di trasferimento globale. Per assicurare la stabilità del sistema è necessario che alla frequenza in cui avviene l'attraversamento a guadagno unitario, indicato con f_1 , lo sfasamento sia minore di 180° ovvero che nel diagramma asintotico l'attraversamento avvenga con una pendenza di 20dB/decade. Se la frequenza di taglio del filtro passa basso f_p è minore della frequenza f_1 , come in figura 2.3 (a) e (b), la stabilità del sistema non è garantita.

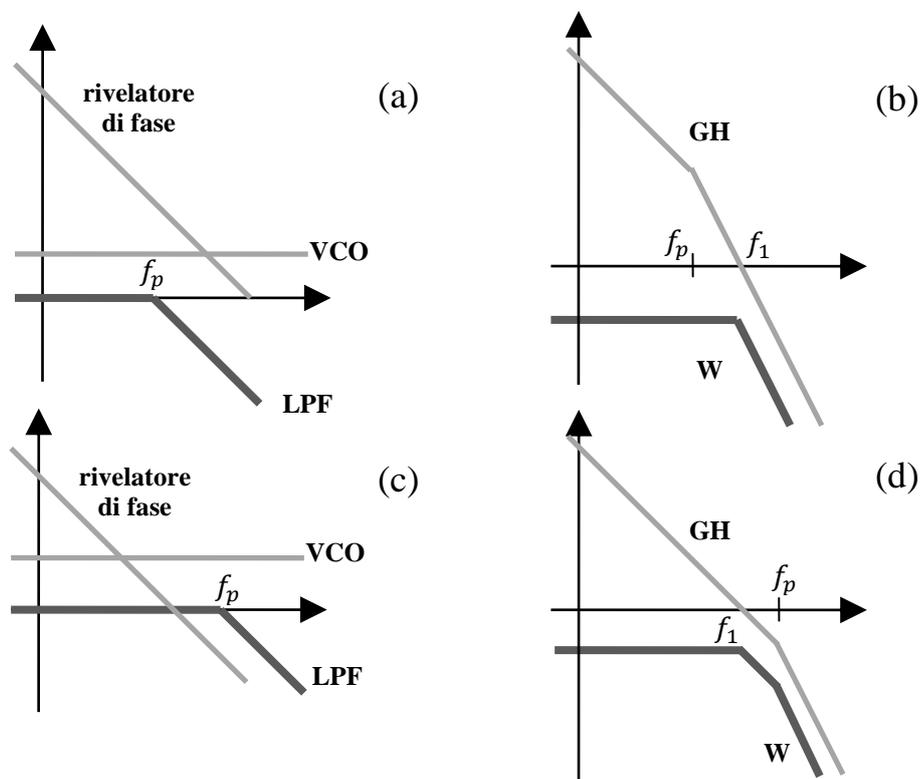


Figura 2.3 – Diagrammi asintotici dei guadagni

Per garantire la stabilità del sistema infatti è necessario che la frequenza f_p sia molto maggiore della frequenza f_1 , come in figura 2.3 (c) e (d). Dovendo inoltre essere la frequenza di ingresso f_i molto maggiore della frequenza di taglio del filtro passa basso, la condizione di stabilità può risultare troppo stringente in talune applicazioni.

Per ovviare a questa limitazione è possibile utilizzare un filtro passa basso di tipo polo zero il quale ha una funzione di trasferimento del tipo:

$$F(s) = A \frac{1 + sT_z}{1 + sT_p}$$

con $f_p < f_z < f_1$. Come si può notare in figura 2.4 permette una maggior flessibilità nel range della frequenza di ingresso del sistema PLL garantendone comunque la stabilità.

In funzione delle differenti esigenze specifiche e del tipo di sistema PLL utilizzato, è possibile utilizzare diversi tipi di filtri passa basso passivi ed anche ove necessario di filtri attivi con degli amplificatori operazionali.

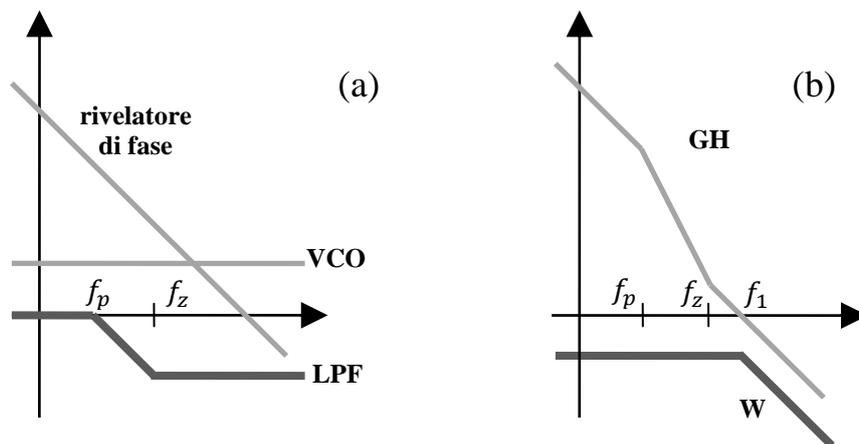


Figura 2.4 – Diagrammi asintotici dei guadagni

Capitolo 3

Il sistema di caricabatterie a PLL

3.1 La scelta della struttura PLL per i caricabatterie

Lo sviluppo del dispositivo di comunicazione mobile e apparecchi portatili e si è rapidamente moltiplicate negli ultimi anni e di pari passo le batterie secondarie diventano una significativa e necessaria fonte di energia per tali dispositivi. Di conseguenza anche il sistema di carica delle batterie secondarie è sempre più importante. La batteria agli ioni di litio (Li-Ion) è divenuta la batteria secondaria più utilizzata perché offre molti vantaggi significativi, come alta densità di energia, nessun effetto memoria e un'alta tensione di funzionamento.

Come notato nel capitolo 1, per quanto concerne le batterie agli ioni di litio vi sono diverse strategie di carica attuabili ma quella più efficace e comunemente utilizzata è la strategia, denominata CC-CV, a due fasi di carica, dapprima a corrente costante e successivamente a tensione costante (Constant Current - Constant Voltage).

Tale strategia suddivide il processo di carica in tre stadi. Nel primo stadio denominato stadio a corrente costante, alla batteria è applicata appunto una corrente costante di 0.7-0.8 C e la tensione ai capi della batteria, a seguito di

questo flusso di carica, tende a crescere fino a raggiungere il valore nominale di carica di 4.2 V per cella. Una volta che la tensione raggiunge tale valore si procede al secondo stadio di carica in cui la tensione ai capi della cella è mantenuta costante e di conseguenza si riduce progressivamente la corrente di carica. Nel momento in cui la corrente di carica arriva a zero, oppure ad un valore minimo di soglia di circa il 2-3% del valore nominale, la batteria risulta completamente carica ed il processo di carica può considerarsi concluso. A batteria completamente carica si entra in un terzo stadio di carica denominato a carica flottante in cui il processo di carica viene interrotto e riprende solamente nel momento in cui la tensione scende al di sotto di una certa soglia. Nella figura 3.1 sono rappresentate, seppure in maniere semplificata, le prime due fasi del processo di carica CC-CV, in cui si vede l'andamento della corrente di carica e della tensione di batteria.

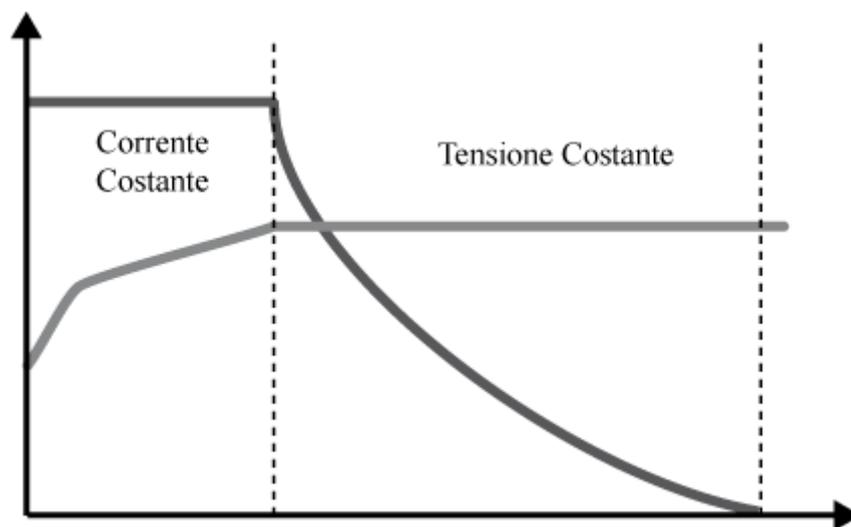


Figura 3.1 – Andamento della tensione di batteria e della corrente di carica durante il processo di carica CC-CV

Tralasciando per il momento quello che avviene una volta che la batteria è completamente carica ovvero le strategie che si attuano nella fase di carica flottante con lo scopo di mantenere un buon livello di carica della batteria senza sottoporla ad inutili stress. Si vuole focalizzare infatti l'attenzione sulle due

distinte fasi del processo di carica CC-CV della batteria agli ioni di litio per questa motivazione anche in figura 3.1 sono state riportati solamente le prime due fasi di carica, tralasciando la fase di carica flottante e la corrente minima di soglia per la definizione di carica completa. L'andamento della corrente e della tensione di batteria presentano notevoli analogie con l'andamento della frequenza e della differenza di fase durante le fasi di aggancio di frequenza e di aggancio di fase di una struttura PLL.

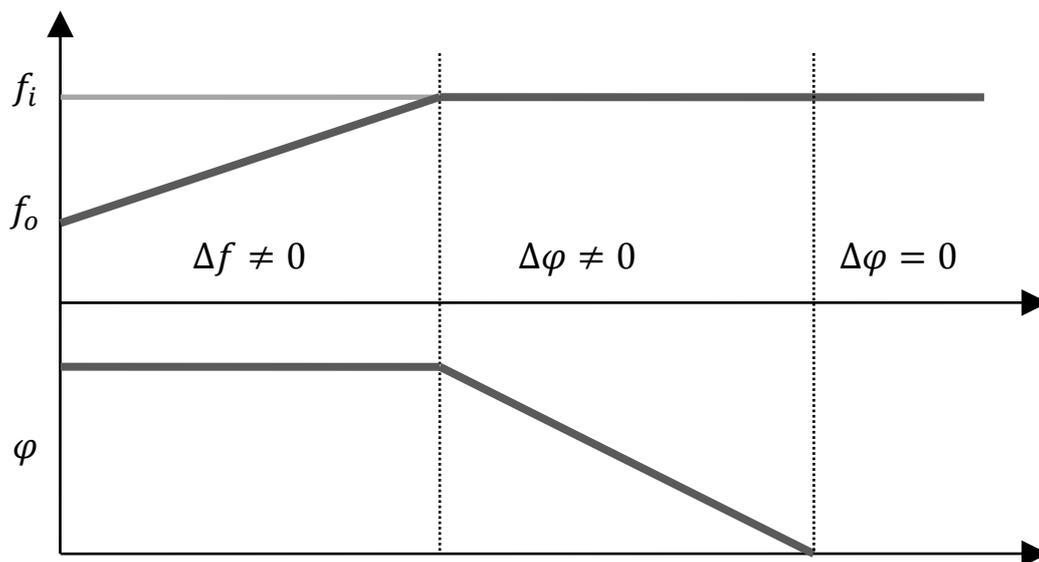


Figura 3.2 – Gli stadi di aggancio di frequenza e di aggancio di fase in un sistema PLL

Nella figura 3.2 sono riportati in maniera estremamente schematica gli andamenti delle frequenze di riferimento e di feedback e della differenza di fase tra le due. Nel primo stadio di aggancio di fase la frequenza f_o cresce fino a raggiungere la frequenza di riferimento f_i . Nel momento in cui avviene l'aggancio di frequenza si entra nello stadio di aggancio di fase dove la differenza di fase tra i due segnali lentamente diminuisce fino al completo aggancio di fase.

Le analogie tra il sistema PLL e il processo di carica CC-CV delle batterie agli ioni di litio suggeriscono quindi la possibilità di utilizzare una struttura PLL per il controllo della corrente di carica del caricabatterie.

3.2 Il sistema di caricabatterie a PLL

Il PLL è stato a lungo utilizzato negli ultimi decenni in una vastissima gamma di applicazioni nel campo della comunicazione, strumentazione e controllo in quanto è un dispositivo che ha molti vantaggi come la stabilità, il costo ridotto e l'elevata precisione.

La figura sottostante rappresenta lo schema a blocchi generale di un Phase-Locked Loop il quale è costituito da tre blocchi distinti: un comparatore di fase/frequenza, un filtro passa basso ed un oscillatore controllato in tensione VCO.

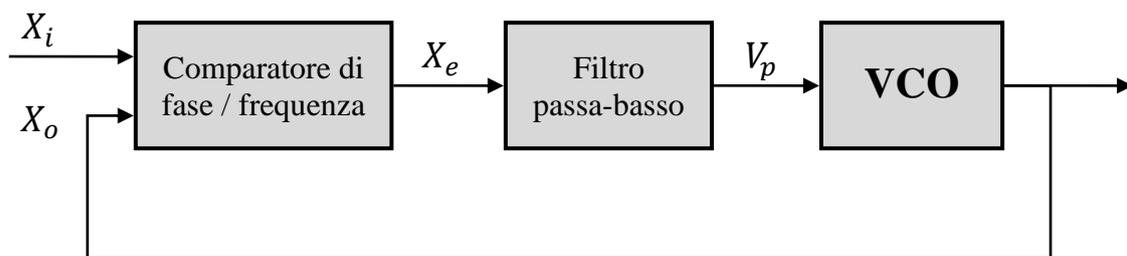


Figura 3.3 – Schema a blocchi di un PLL

In figura 3.3 sono indicate la fase/frequenza in ingresso X_i , la fase/frequenza di uscita X_o , la differenza tra fase/frequenza in ingresso e quella in uscita X_e detta anche errore di fase/frequenza e la tensione V_p di pilotaggio dell'oscillatore. Il comparatore di fase/frequenza viene utilizzato per confrontare la fase/frequenza in ingresso X_i con la fase/frequenza di uscita X_o al fine di ottenere la differenza ovvero l'errore di fase/frequenza. Il filtro passa basso (LPF) a partire dall'errore di fase/frequenza funziona come un driver per la tensione dell'oscillatore VCO. Il sistema del PLL è un sistema a retroazione che tende a portare la frequenza in uscita dall'oscillatore VCO vicina a quella di riferimento in ingresso e quindi di ridurre al minimo l'errore di fase/frequenza del comparatore. Il segnale di uscita quindi può seguire il segnale in ingresso sia in frequenza che in fase.

Il sistema di caricabatteria con struttura di controllo a PLL riprende fedelmente tale struttura; in tale sistema però il blocco rappresentato generalmente da un filtro passa basso viene scomposto in tre blocchi distinti: un blocco di pompa di corrente, la batteria agli ioni di litio appunto da caricare ed un amplificatore differenziale. L'insieme di tutti questi tre blocchi funziona come un filtro passa basso e quindi la struttura classica del PLL è rispettata.

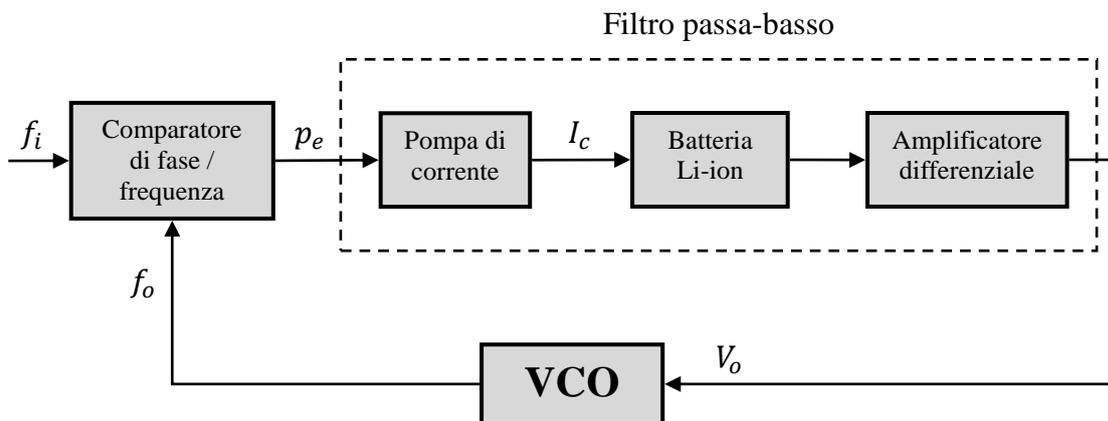


Figura 3.4 – Schema a blocchi

Nella figura 3.4 riportata qui sopra abbiamo uno schema generale del sistema di carica basato su PLL dove sono messi in evidenza tutti i blocchi: il comparatore di fase, il blocco di pompa di corrente, la batteria agli ioni di litio, l'amplificatore differenziale e l'oscillatore controllato in tensione VCO.

Essendo la batteria agli ioni di litio il nodo cruciale del sistema caricabatterie si procede ad una descrizione del funzionamento partendo da tale blocco. La tensione rilevata ai capi della batteria viene inviata all'amplificatore differenziale il quale amplifica tale tensione in un valore adatto nel range di ingresso dell'oscillatore controllato in tensione VCO. Successivamente, il VCO oscilla ad una frequenza proporzionale alla tensione ricevuta la quale diviene la frequenza di feedback del sistema. Il comparatore di fase confronta quindi la frequenza di feedback retroazionata dal sistema con la frequenza di ingresso o di riferimento per generare l'errore di fase il quale viene inviato al blocco della

pompa di corrente che genera la corrente di carica adatta al processo di carica della batteria. Dopo molti cicli in cui la corrente di carica della batteria segue l'andamento descritto precedentemente passando per i diversi stadi di carica la batteria agli ioni di litio risulta quindi pienamente carica.

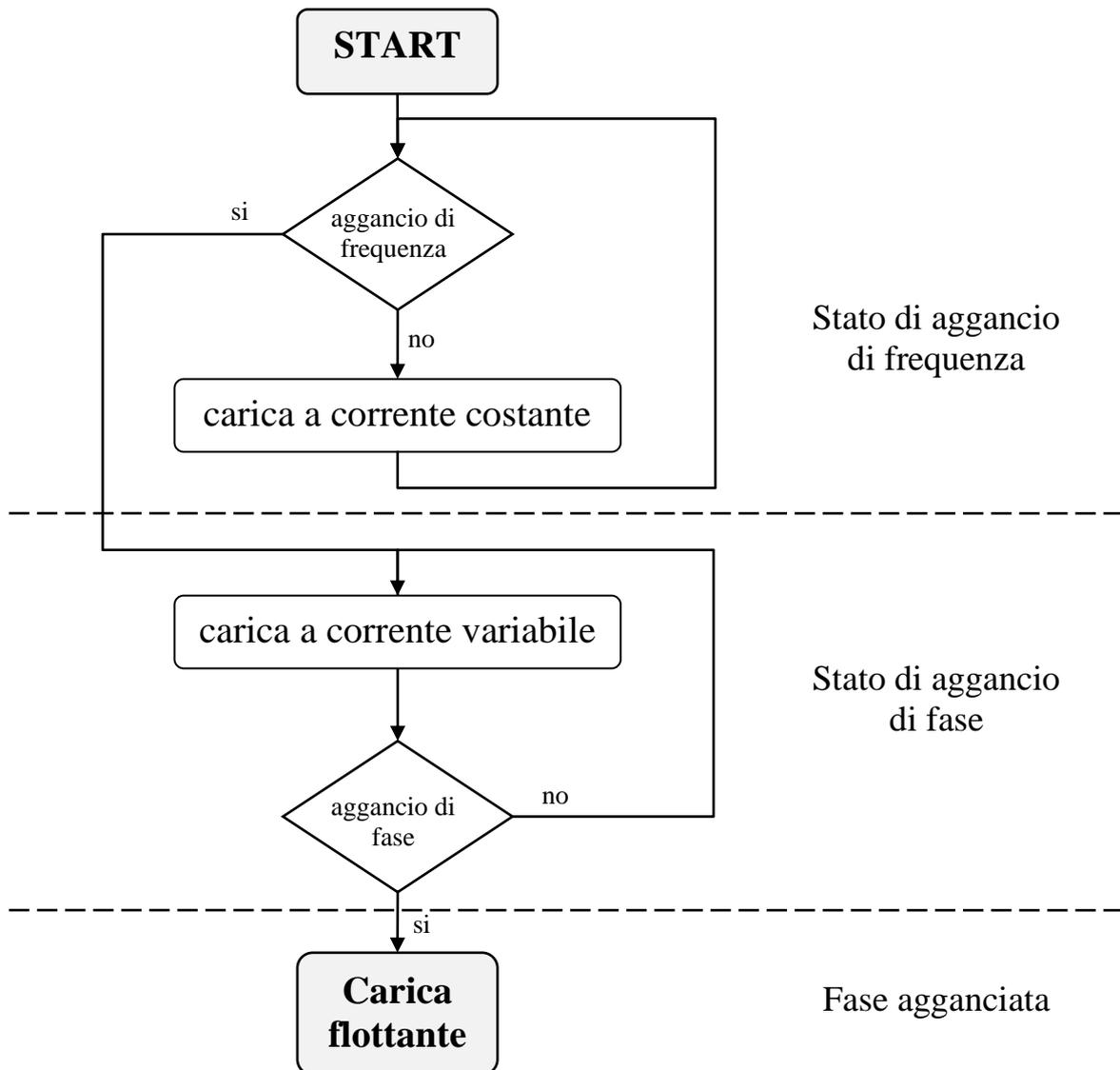


Figura 3.5 – Diagramma di flusso

Con riferimento appunto alla particolare tipologia del processo di carica CC-CV delle batterie agli ioni di litio basata su tre momenti distinti è possibile descrivere tale processo mediante un diagramma di flusso come quello riportato nella figura 3.5. In tale diagramma sono messi in evidenza le tre distinte fase del

processo di carica; lo stato di aggancio di frequenza corrispondente ad un processo di carica a corrente costante, uno stato di aggancio di fase corrispondente ad un processo di carica a corrente variabile ed infine uno stato in cui ho il completo aggancio della fase ed il processo di carica risulta ultimato. Nello stato di aggancio di frequenza, all'uscita del blocco del filtro passa basso è presente un valore di tensione pari al limite massimo del range di ingresso dell'oscillatore controllato VCO al fine di ridurre il più rapidamente possibile la differenza tra la frequenza di ingresso e di frequenza di feedback. Parallelamente in tale situazione il blocco della pompa di corrente eroga alla batteria una corrente costantemente pari al valore limite massimo impostato come ci si aspetta nello stato di carica a corrente costante. Di seguito, nello stato di aggancio di fase, all'uscita del filtro passa basso la tensione che va a pilotare l'oscillatore controllato in tensione VCO decresce progressivamente. L'effetto ottenuto nel blocco di pompa di carica è una decrescita conseguente della corrente di caricare della batteria ovvero una fase del processo di carica a corrente variabile. Nell'ultimo stadio, quando cioè il PLL è nello stato di aggancio di fase, la frequenza/fase di feedback è uguale alla frequenza/fase di ingresso; ne consegue che anche la corrente di uscita dal blocco di pompa di corrente è nulla ed il processo di carica può quindi definirsi completo. In quest'ultimo stato, quando la carica della batteria è completa, il sistema di controllo è in equilibrio stabile ed il processo di carica entra nella fase flottante. La figura 3.6 rappresenta graficamente quelle che sono le relazioni tra lo stato di phased-locked, lo stato di phase-tracking, di frequency-tracking, il range aggancio, il range di cattura, il tutto in funzione dell'errore di fase. Inoltre tali parametri sono relazionati alla pompa di corrente per poterne poi valutare la funzione di trasferimento.

Coerentemente con il diagramma a blocchi descritto precedentemente lo stato di phase-locked corrisponde al momento in cui la carica è ultimata e quindi

corrisponde al momento in cui l'errore di fase del sistema si annulla $p_e = 0^\circ$. Il range dello stato di phase-tracking, corrispondente alla fase di carica a corrente variabile, corrisponde ad un errore di fase compreso tra -360° e $+360^\circ$ ovvero $p_e \leq |360^\circ|$. Tale range deve inoltre essere uguale al range di aggancio del sistema. Il range di cattura del sistema invece deve essere più grande del range dello stato di frequency-tracking corrispondente alla fase a corrente costante nel sistema di caricabatteria. Il range dello stato di frequency-tracking deve inoltre rispettare la condizione $|360^\circ| < p_e \leq |f_t|$.

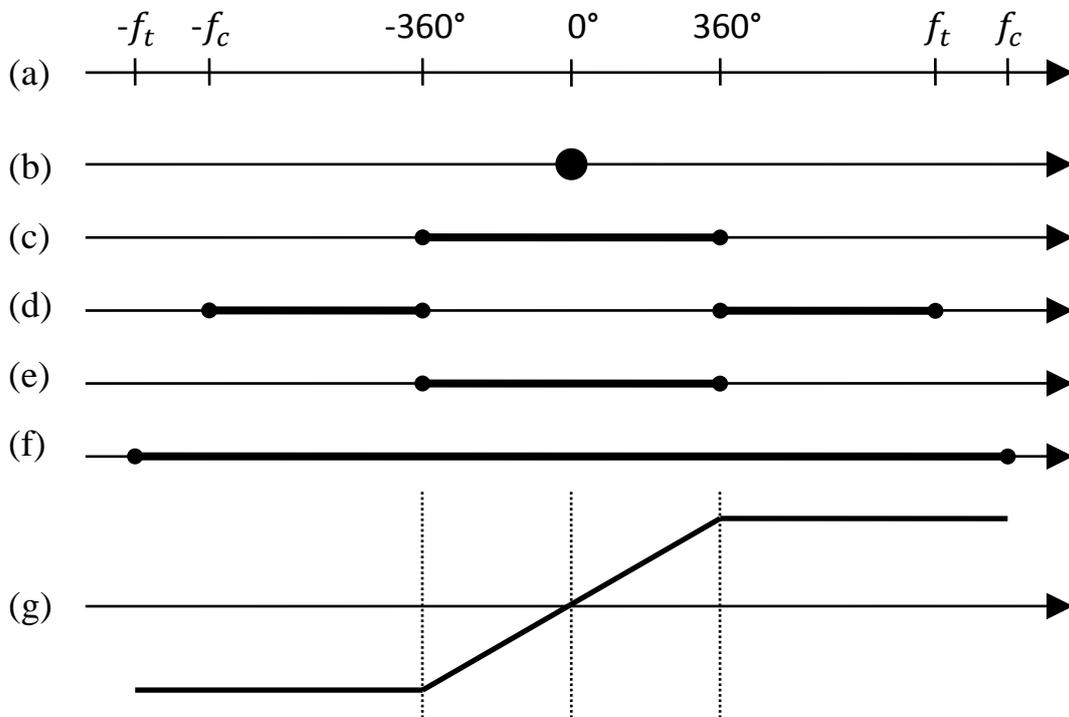


Figura 3.6 – (a) errore di fase – (b) stato di phased-locked (c) lo stato di phase-tracking (d) stato di frequency-tracking (e) range aggancio – (f) range di cattura – (g) pompa di corrente

Nei sistemi di caricabatterie a PLL al blocco del rilevatore di fase è richiesto un range di lavoro speculare $p_e \leq |360^\circ|$ e non limitato solamente agli errori di fase positivi. Inoltre la funzione di trasferimento tra l'errore di fase e la tensione in uscita deve essere possibilmente lineare poiché tale tensione va poi al blocco di pompa di corrente e conseguentemente genera la corrente di carica. Pertanto,

in tali sistemi la scelta del comparatore di fase è orientata verso una tipologia di tipo positive edge-triggered in quanto tali rivelatori, oltre a garantire il range richiesto, hanno una caratteristica lineare ed una funzione di trasferimento come riportata in figura 3.6.

Rispetto alla classica struttura PLL, nel sistema di caricabatterie con struttura di controllo a PLL é presente un ulteriore blocco tra il rivelatore di fase ed il filtro passa-basso con la funzione di pompa di corrente. Tale inserimento però non modifica né lo schema né il funzionamento generale del PLL e viene spesso utilizzato nelle strutture dei PLL utilizzati nella comunicazione o sistemi di controllo. La presenza di tale blocco non è una novità inedita nella struttura PLL però, a differenza di altri sistemi, nel caricabatterie questo blocco assume un'importanza particolare in quanto la corrente di uscita dal blocco di pompa di corrente è proprio la corrente inviata alla batteria e utilizzata direttamente nel processo di carica. L'intensità di tale corrente sarà quindi consistente.

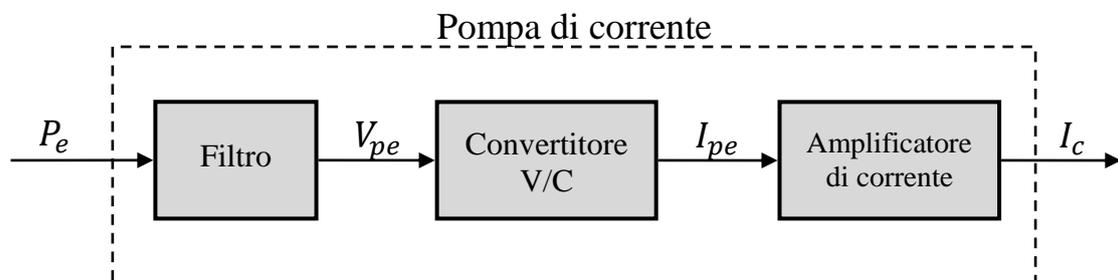


Figura 3.7 – Schema a blocchi

La figura 3.7 riportata qui sopra mostra lo schema a blocchi della pompa di corrente nel sistema di caricabatterie a PLL. Il blocco di pompa di corrente utilizzato nel sistema si può infatti scomporre in un filtro, un convertitore di tensione in corrente V/C ed un amplificatore di corrente. L'amplificatore di corrente nello stadio finale viene utilizzato per amplificare un piccolo valore della corrente in un valore di corrente congruo alla ricarica della batteria. Il funzionamento della pompa di corrente utilizzata nel sistema di caricabatterie a

PLL è descritto di seguito; in primo luogo, l'errore di fase impulsivo P_e , differenza tra la fase / frequenza di feedback f_o / p_o e la fase/frequenza in ingresso f_i / p_i , viene inviato al filtro il quale genera una tensione continua V_{pe} . Questa tensione continua è direttamente proporzionale all'errore di fase P_e , e viene chiamato tensione dell'errore di fase V_{pe} . Procedendo, secondo la rappresentazione del diagramma a blocchi, si giunge al convertitore V / C in cui la tensione dell'errore di fase V_{pe} viene trasformata in una corrente dell'errore di fase I_{pe} e quindi di seguito, attraverso l'ultimo blocco dell'amplificatore di corrente, la corrente viene amplificata per produrre la corrente di carica I_c che interviene direttamente nel processo di carica della batteria.

Come rappresentato nella figura 3.8 sottostante, quando l'errore di fase è piccolo, la durata dell'impulso dell'errore di fase V_{pe} è piccola e di conseguenza il valore della tensione dell'errore di fase in uscita V_{pe} , la quale ne rappresenta il valor medio, è piccolo. Tale situazione è rappresentata nella figura 3.8.a in alto mentre in basso nella figura 3.8.b viene rappresentata la situazione contraria corrispondente ad uno sfasamento elevato che genera in uscita una tensione dell'errore di fase V_{pe} elevato. La relazione poi tra la tensione V_{pe} e la corrente di batteria I_c è da considerarsi lineare in quanto è solamente una conversione tra due differenti grandezze in gioco.

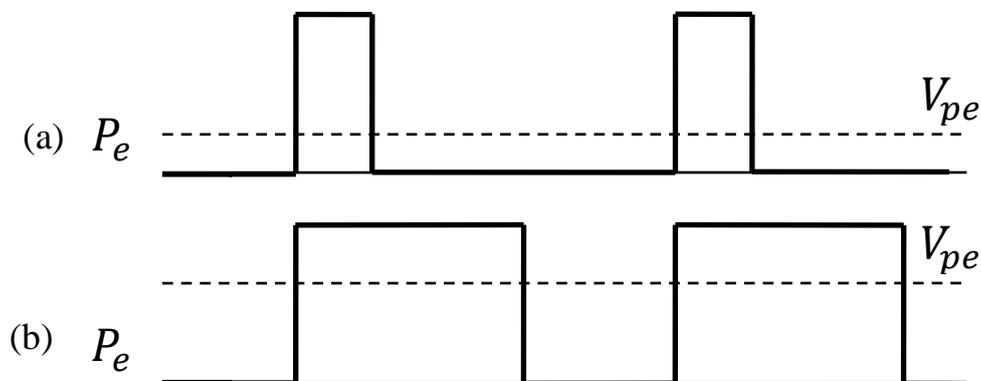


Figura 3.8

3.3 Analisi matematica del sistema

Nell'analisi matematica del sistema nella rappresentazione della batteria è stato adottato un modello semplificato che comprende una resistenza equivalente in serie ed un condensatore equivalente in parallelo. Tali valori della resistenza e condensatore equivalenti possono essere ottenuti in maniera sperimentale in quanto differiscono in base alla particolare batteria utilizzata. La funzione di trasferimento di una batteria può comunque essere rappresentata come:

$$B(s) = \frac{V_b(s)}{I_c(s)} = \frac{1 + s r_r C_b}{s C_b}$$

dove r_r è la resistenza equivalente in serie della batteria e C_b è il condensatore equivalente in parallelo.

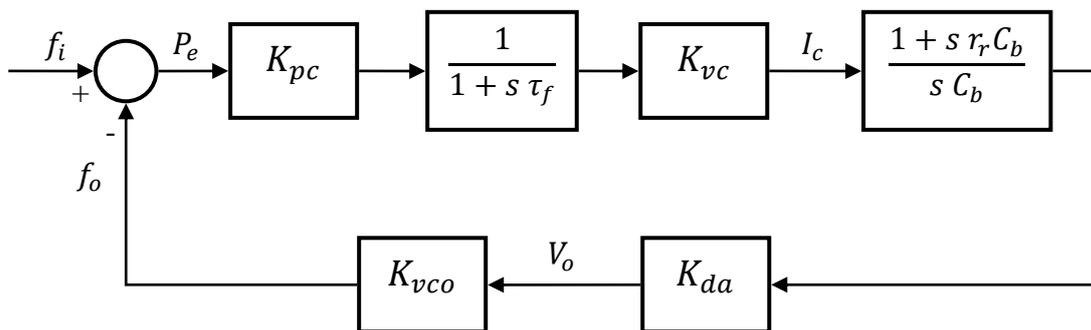


Figura 3.9

La figura 3.9 rappresenta il modello matematico di un caricabatterie basato sul PLL. I parametri di questo modello matematico sono definiti come segue:

- K_{pc} : il guadagno del comparatore di fase [V/rad]
- τ_f : la costante di tempo del filtro del blocco pompa di corrente
- K_{vc} : il rapporto di conversione del convertitore V/C e dell'amplificatore di corrente [A/V]
- K_{da} : il guadagno dell'amplificatore differenziale
- K_{vco} : il rapporto di conversione del VCO [rad/V]

In accordo con quanto rappresentato nel modello matematico, la funzione di trasferimento globale del sistema caricabatterie - $T(s)$ - può essere ottenuto e scritto nella forma:

$$T(s) = \frac{V_b(s)}{f_i(s)} = \frac{sr_r C_b K + K}{s^2 C_b \tau_f + s(C_b + r_r C_b K_f) + K_f}$$

dove:

$$K = K_{pc} \cdot K_{vc}$$

$$K_f = K_{pc} \cdot K_{vc} \cdot K_{da} \cdot K_{vco}$$

L'equazione caratteristica globale può quindi essere facilmente ricavata e scritta nella forma:

$$s^2 C_b \tau_f + s(C_b + r_r C_b K_f) + K_f$$

A partire dall'equazione caratteristica del caricabatterie a PLL è possibile studiarne la stabilità applicando il criterio di Routh. Per avere solamente radici a parte reale negativa, che garantiscono la stabilità del sistema, possiamo andare a valutare il segno dei coefficienti dell'equazione caratteristica.

Le condizioni di stabilità per il sistema di caricabatterie a PLL sono quindi le seguenti:

$$C_b > 0$$

$$C_b \tau_f + r_r C_b K_f > 0$$

$$K_f > 0$$

Poiché tutti i parametri τ_f , C_b , r_r e K_f sono numeri reali positivi, tutte e 3 le equazioni scritte in precedenza sono sempre verificate e di conseguenza il sistema di caricabatterie con tale struttura di controllo a PLL è stabile.

Oltre alla stabilità però è fondamentale garantire che durante la fase di carica non vi sia una sovraccarica della batteria agli ioni di litio per non compromettere l'integrità della batteria stessa oppure quella del sistema di caricabatterie. Si devono fare pertanto delle considerazioni sul coefficiente di smorzamento ξ del guadagno a catena aperta del sistema per limitare eventuali sovraelongazioni

potenzialmente dannose. In primo luogo tale coefficiente deve essere maggiore di zero in quanto se fosse negativo sarebbe sintomatico della presenza di poli a parte reale positiva con conseguente instabilità e tale situazione è già stata esclusa precedentemente con l'applicazione del criterio di Routh. Inoltre se il coefficiente di smorzamento ξ fosse maggiore di 1 allora i poli del sistema sarebbero reali e distinti e di conseguenza la risposta del sistema simile a quella di un sistema del primo ordine nell'ipotesi di un polo dominante. In tali condizioni quindi non si riscontrano oscillazioni e quindi sovra elongazioni nel processo di carica. Di contro però, un elevato valore del fattore di smorzamento comporta una risposta del sistema molto lenta ed anche questa è una controindicazione che si vuole evitare.

Per valori di ξ compresi tra 0 e 1, invece, la funzione di trasferimento $G(s)$ presenta due poli complessi coniugati a parte reale negativa ottenendo quindi in risposta un'oscillazione smorzata. L'entità della massima sovraelongazione risulta massima per ξ uguale a zero, in cui il sistema oscilla, e decresce progressivamente avvicinandosi all'unità.

Dovendo quindi fare un compromesso tra la limitazione delle sovraelongazioni pericolose per la sicurezza del sistema e la velocità di risposta del sistema si può concludere che il fattore di smorzamento ottimale si ottiene per valori prossimi all'unità.

Il fattore di smorzamento ξ può essere definito mediante la seguente relazione:

$$\xi = \frac{a}{2\omega_n} \quad \text{dove} \quad a = \frac{(C_b + r_r C_b K_f)}{C_b \tau_f} \quad \text{e} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_f}{C_b \tau_f}}$$

ottenendo la relazione:

$$\xi = \frac{\sqrt{C_b} \cdot (1 + r_r K_f)}{2\sqrt{\tau_f K_f}}$$

Nel sistema il guadagno del comparatore di fase K_{pc} , il rapporto di conversione del convertitore V/C e dell'amplificatore di corrente K_{vc} , il guadagno

dell'amplificatore differenziale K_{da} e il rapporto di conversione del VCO K_{vco} sono tutti delle costanti del PLL. La resistenza equivalente in serie r_r e il condensatore equivalente della batteria C_b , invece, sono parametri che dipendono dal particolare tipo di batteria scelta. Pertanto, la scelta della costante di tempo τ_f del filtro del primo ordine associato al blocco di pompa di corrente appare come l'ultimo grado di libertà disponibile. Tale scelta deve quindi essere effettuata opportunamente al fine di garantire che il sistema caricabatterie lavori sempre in condizioni di sicurezza. L'equazione del fattore di smorzamento ξ del sistema ricavata precedentemente può quindi essere riscritta in funzione della costante di tempo τ_f al fine di mettere direttamente in evidenza la condizione a cui deve sottostare τ_f per garantire la completa sicurezza di carica:

$$\tau_f = \frac{1}{\xi^2} \cdot \frac{C_b}{4K_f} \cdot (1 + r_r K_f)^2$$

Riprendendo le considerazioni effettuate sul fattore di smorzamento con la scelta di un valore prossimo all'unità è quindi possibile scrivere la condizione come:

$$\tau_f \approx \frac{C_b \cdot (1 + r_r K_f)^2}{4K_f}$$

3.4 Il prototipo di un caricabatterie a PLL

Si procede ora alla presentazione di un prototipo di caricabatterie con una struttura di controllo del processo di carica di tipo PLL per valutare le prestazioni di tale sistema. Lo schema circuitale del sistema caricabatterie è rappresentato in figura 3.10 ed è composto dal comparatore di fase di tipo positive edge-triggered, dall'oscillatore controllato in corrente VCO, il blocco di pompa di corrente, l'amplificatore differenziale e ovviamente la batteria agli ioni di litio. La funzione del blocco di pompa di corrente, come teorizzato in precedenza, è a sua volta realizzata dalla composizione di un filtro RC del primo ordine, un convertitore V/C ed un amplificatore di corrente.

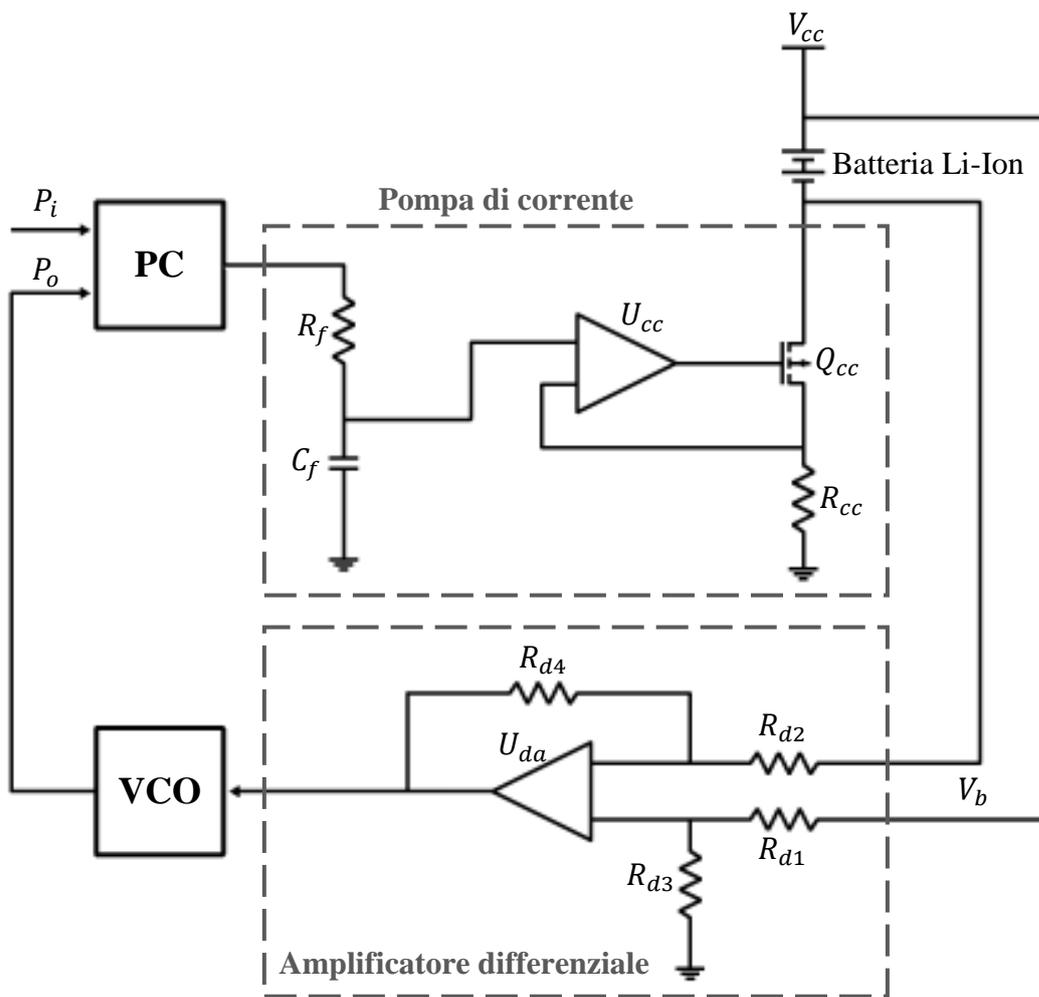


Figura 3.10

Partendo dall'analisi del blocco di pompa di corrente, il filtro RC del primo ordine è costituito da una resistenza e da un condensatore e di conseguenza la costante di tempo del filtro ad esso associata è del tipo:

$$\tau_f = R_f \cdot C_f$$

Sempre nel blocco di pompa di corrente, i sottoblocchi del convertitore V/C e dell'amplificatore di corrente sono stati implementati tramite un'unica soluzione comprendente un amplificatore operazione U_{cc} , un MOSFET di potenza Q_{cc} , e una resistore R_{cc} . Così facendo in questa porzione di circuito vengono eseguite due funzioni ovvero la conversione della tensione in corrente e l'amplificazione della stessa ad un valore congruo per essere inviato alla batteria agli ioni di litio.

Di conseguenza nello schema generale il prodotto $K_{vc} \cdot K_{ca}$ è definito dalla seguente relazione:

$$K_{vc} \cdot K_{ca} \approx \frac{1}{R_{cc}}$$

A seguito della batteria è presente il blocco dell'amplificatore differenziale il quale è realizzato tramite un amplificatore operazionale U_{da} con un opportuno guadagno determinato da quattro resistenze: R_{d1} , R_{d2} , R_{d3} e R_{d4} . Imponendo le seguenti uguaglianze:

$$R_{d1} = R_{d2} = R_1 \quad \text{e} \quad R_{d3} = R_{d4} = R_2$$

il guadagno dell'amplificatore differenziale risultante può essere espresso dalla seguente relazione:

$$K_{da} = \frac{R_1}{R_2}$$

Per quanto concerne l'oscillatore controllato in tensione, il rapporto di conversione, supposto che il VCO sia lineare, è quindi definito come:

$$K_{vco} = \frac{f_{o,max} - f_{o,min}}{V_{o,max} - V_{o,min}}$$

dove $f_{o,max}$ è il massimo della frequenza di uscita dall'oscillatore, $f_{o,min}$ è il minimo della frequenza in uscita dal VCO, mentre $V_{o,max}$ e $V_{o,min}$ sono rispettivamente la tensione massima e la tensione minima che riceve in ingresso l'oscillatore VCO.

Solitamente, la tensione massima $V_{o,max}$ in ingresso al VCO è pari alla tensione di alimentazione V_{cc} , mentre la tensione minima $V_{o,min}$ è uguale a zero.

L'equazione precedente si può quindi riscrivere come di seguito:

$$K_{vco} = \frac{f_{o,max} - f_{o,min}}{V_{cc}}$$

Il grafico del guadagno di tensione del comparatore di fase di tipo positive edge triggered si può dedurre dalla rappresentazione in figura 3.11 la quale è un dettaglio della figura 3.8 precedente.

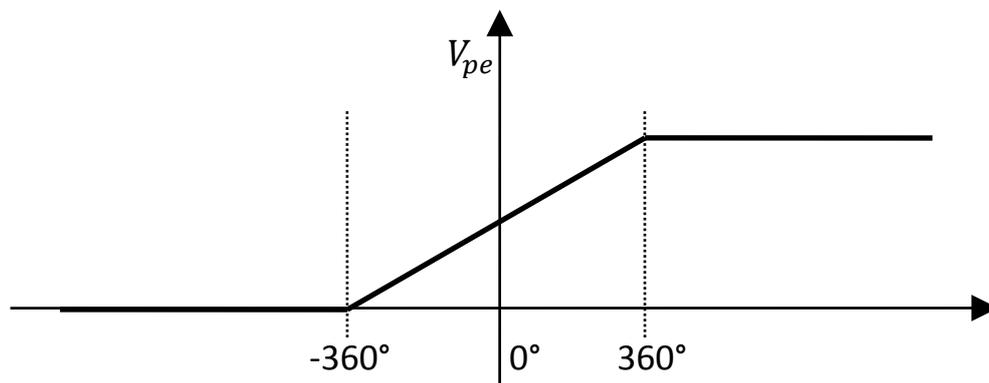


Figura 3.11 – Funzione di trasferimento del comparatore di fase

Dalla figura 3.11 appare infatti chiaro come tale funzione di trasferimento possa essere scritta nella forma:

$$K_{pc} = \frac{V_{pe,max}}{2\pi}$$

dove $V_{pe,max}$ è la tensione massima in uscita dal blocco di pompa di corrente la quale solitamente viene posta uguale alla tensione di alimentazione V_{cc} . Di conseguenza il guadagno del blocco comparatore di fase può essere riscritto nella forma:

$$K_{pc} = \frac{V_{cc}}{2\pi}$$

Sfruttando le relazioni appena trovate, sono determinati tutti i coefficienti per il calcolo della funzione di trasferimento globale del sistema di caricabatterie. Possono quindi essere determinate le condizioni di stabilità del sistema e di lavoro in condizioni di sicurezza.

Con riferimento al prototipo di figura 3.10 ed alle relazioni trovate si procede alla scelta delle componenti ed al corretto dimensionamento del sistema il quale può essere schematizzato in cinque passi distinti.

Per quanto concerne i blocchi del rivelatore di fase e dell'oscillatore controllato in tensione VCO è consueto l'utilizzo di un PLL integrato dove è possibile utilizzare la presenza di tali blocchi in quanto la realizzazione diretta è piuttosto complicata. Come prima cosa quindi si calcola il valore del rapporto di

conversione dell'oscillatore controllato in tensione K_{vco} , supposto lineare, ed il guadagno del comparatore di fase K_{pc} dei due blocchi presenti nell'integrato utilizzando le seguenti espressioni trovate pocanzi:

$$K_{vco} = \frac{P_{o,max} - P_{o,min}}{V_{cc}} \qquad K_{pc} = \frac{V_{cc}}{2\pi}$$

In secondo luogo, fondamentale è la scelta di un Mosfet di potenza congruo a generare la corrente di carica adeguata al processo di carica della batteria agli ioni di litio. In accordo con la capacità della batteria stessa (C-rate misurato in Ah) dichiarata dal produttore della batteria, la corrente erogata dal source del Mosfet di potenza scelto deve essere almeno più grande di 0.7 C ovvero al valore di corrente imposto durante la fase a corrente costante. Tale è il valore massimo di corrente dell'intero processo in quanto nel successivo stadio a corrente variabile l'intensità di corrente va progressivamente a scemare fino ad annullarsi.

Di seguito quindi si determina si vincola il valore della resistenza R_{cc} del blocco di pompa di corrente al valore massimo della corrente di source del Mosfet di potenza appena determinato – 0.7 C – ottenendo la relazione:

$$R_{cc} = \frac{V_{pe,max}}{0.7 C}$$

Si vuole in questo modo impedire la presenza di una sovracorrente di carica nella batteria. Secondo tale relazione infatti, in corrispondenza del valore massimo di tensione in ingresso, la corrente di carica risulta correttamente limitata a 0.7 C.

Passando al blocco dell'amplificatore differenziale vengono determinati i valori di R_1 e di R_2 e quindi indirettamente anche di tutte e quattro le resistenze avendo posto come condizione $R_{da1} = R_{da2} = R_1$ e $R_{da3} = R_{da4} = R_2$. Il blocco dell'amplificatore differenziale nel sistema del caricabatterie a PLL ha la funzione di scalare il valore della tensione rilevato ai capi della batteria ad un valore congruo nel range dell'oscillatore controllato in tensione VCO. Si vuole

inoltre ottenere che la tensione finale, ovvero la tensione ai capi della batteria quando risulta completamente carica, sia uguale alla tensione che si ha quando avviene l'aggancio di frequenza. Di conseguenza la relazione che deve essere soddisfatta nella determinazione di R_1 e di R_2 è la seguente:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{f_i/K_{vco}}{V_{b,final}}$$

L'ultimo grado di libertà rimasto, ovvero l'ultimo blocco da determinare, è relativo ai valori della resistenza R_f , del condensatore C_f e della relativa costante di tempo τ_f del filtro passa basso presente nel blocco di pompa di corrente. Per tale blocco deve essere verificata la condizione che garantisca che la carica della batteria avvenga in condizioni di sicurezza trovata in precedenza:

$$\tau_f = R_f \cdot C_f \geq \frac{C_b \cdot (1 + r_r K_f)^2}{4K_f}$$

in cui K_f è data dal prodotto di diversi coefficienti, determinati dalle scelte precedenti, secondo la relazione $K_f = K_{pc} \cdot K_{vc} \cdot K_{da} \cdot K_{vco}$.

3.5 Le performance del sistema

Si vuole ora verificare che il prototipo del sistema di caricabatterie a PLL si comporti come preventivato ovvero realizzi il processo di carica secondo la tecnica CC-CV. In figura 3.12 è quindi riportato l'andamento della corrente di carica della batteria e la tensione di circuito aperto della batteria. Si nota come tali grandezze seguano l'andamento preventivato ovvero in dettaglio la corrente di carica del sistema presenti una prima fase costante durante la quale la tensione di circuito aperto della batteria cresce progressivamente. Di seguito si riscontra una fase dove la corrente di carica decresce progressivamente e la tensione di batteria rimane pressoché costante. Quando poi la corrente decresce fino a raggiungere un valore minimo di soglia il processo di carica risulta completo e si entra nella fase flottante.

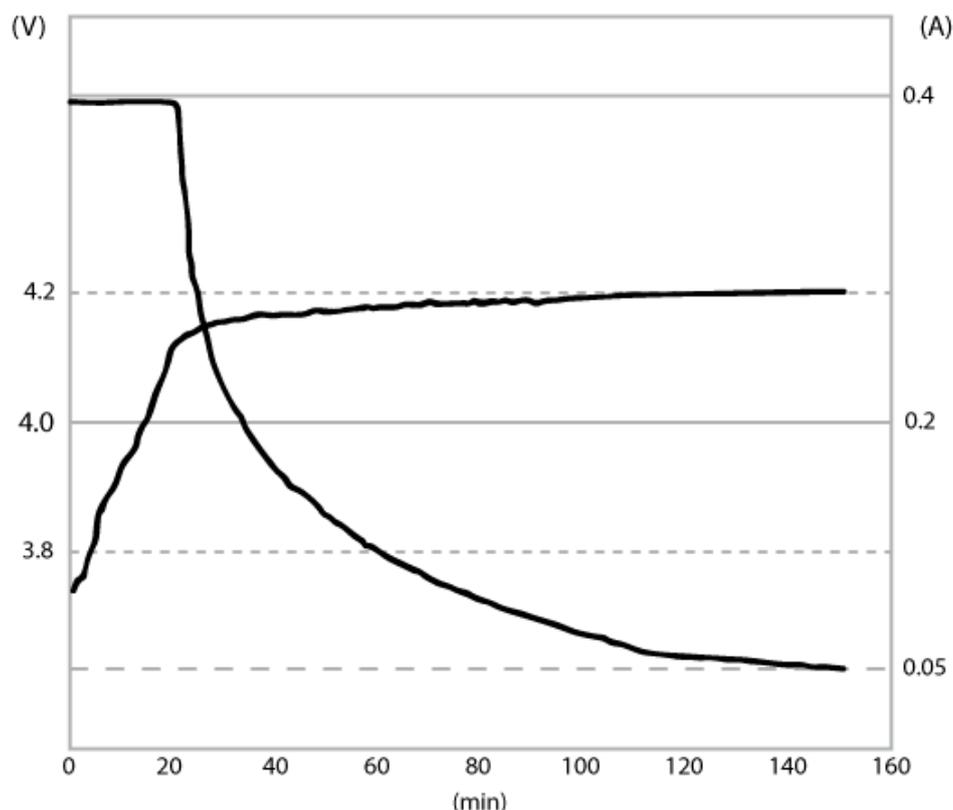


Figura 3.12 – La tensione ai capi della batteria e la corrente di carica di una batteria agli ioni di litio nel sistema di carica a PLL [12]

Dalla rappresentazione della tensione ai capi della batteria agli ioni di litio in figura 3.12 è possibile notare come durante la fase a corrente variabile, teoricamente caratterizzata da una tensione di batteria costante, tale tensione non sia costante ma cresca leggermente fino ad arrivare al valore nominale che teoricamente avrebbe già essere stato raggiunto dopo la fase a corrente costante. Questa discrepanza dalla condizione ideale suggerisce che il sistema reale possa essere migliorabile sotto questo aspetto in quanto lo stadio di carica a corrente costante si arresta anticipatamente non permettendo alla tensione ai capi della batteria di raggiungere il valore nominale e quindi le migliori performance del sistema. Questa situazione, come si verificherà nel capitolo successivo, è dovuta ad un errore nella rilevazione della tensione ai capi della batteria.

Ad ulteriore conferma delle differenza di comportamento nel sistema durante i differenti stadi di carica, è possibile porre l'attenzione sul segnale di feedback in relazione al segnale di riferimento al fine di confermare come avvenga il

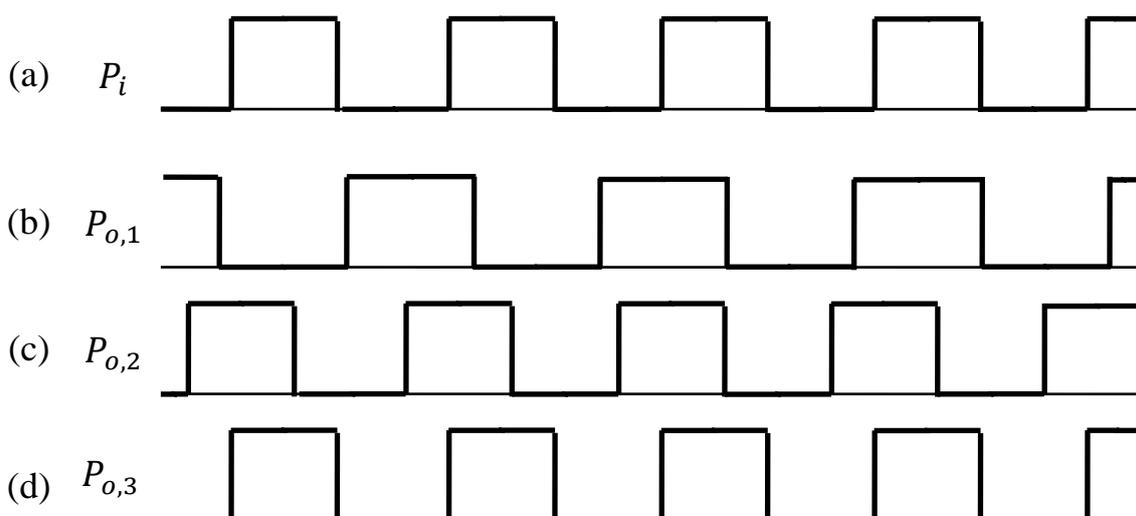


Figura 3.13 – Il segnale di riferimento P_i ed il segnale di feedback P_o in diversi istanti temporali del processo di carica

processo di aggancio tra i due. In figura 3.13 sono rappresentati gli andamenti delle forme d'onda del segnale di riferimento P_i e del segnale di feedback P_o in diversi istanti temporali del processo di carica.

In figura 3.13-a in alto è rappresentato il segnale di riferimento P_i , mentre in figura 3.13-b è rappresentato il segnale di feedback P_o generato dall'oscillatore controllato in tensione durante il primo periodo di carica. Si nota come tale segnale, rispetto a quello di riferimento, abbia una frequenza diversa e fa appunto riferimento alla fase di aggancio di frequenza caratterizzata da una corrente costante. In figura 3.13-c e d, invece, il segnale di feedback P_o ha già raggiunto l'aggancio di frequenza e progressivamente riduce la differenza di fase per giungere anche all'aggancio di fase. In figura 3.13-c il sistema lavora quindi nello stato di aggancio di fase, corrispondente nel processo di carica nello stato a corrente variabile, fino a giungere poi in figura 3.13-d al perfetto aggancio e quindi a carica completa. Le forme d'onda in figura 3.13-b-c-d sono quindi rappresentative dei tre stati distinti del processo di carica di una batteria agli ioni di litio.

Capitolo 4

Il sistema di caricabatterie a PLL compensato

4.1 Il modello della batteria agli ioni di litio

Nella realizzazione pratica delle batterie agli ioni di litio accade spesso che la struttura utilizzata non sia semplice come quella teorizzata precedentemente. Si riscontra, ad esempio, una leggera discrepanza tra la tensione rilevata ai morsetti della batteria e la tensione di effettivo lavoro della cella agli ioni di litio. Tale differenza, essendo lieve, non compromette l'integrità funzionale del sistema di carica, però non permette al sistema di lavorare nelle condizioni ottimali. La tensione di batteria, infatti, rappresenta il valore retroazionato dal sistema, la grandezza di controllo. La presenza di un errore nella misurazione di tale tensione si ripercuote nel segnale di feedback in uscita dall'oscillatore e, attraverso il comparatore di fase, inficia il valore della corrente di carica. Rilevare e compensare tale discrepanza permette di migliorare le performance del sistema di carica a PLL presentato precedentemente.

La figura 4.1 mostra la struttura tipica del pacchetto di una batteria agli ioni di litio nella quale il percorso di carica dal terminale positivo al terminale negativo si compone dei connettori terminali, di un fusibile termico, di due MOSFET di

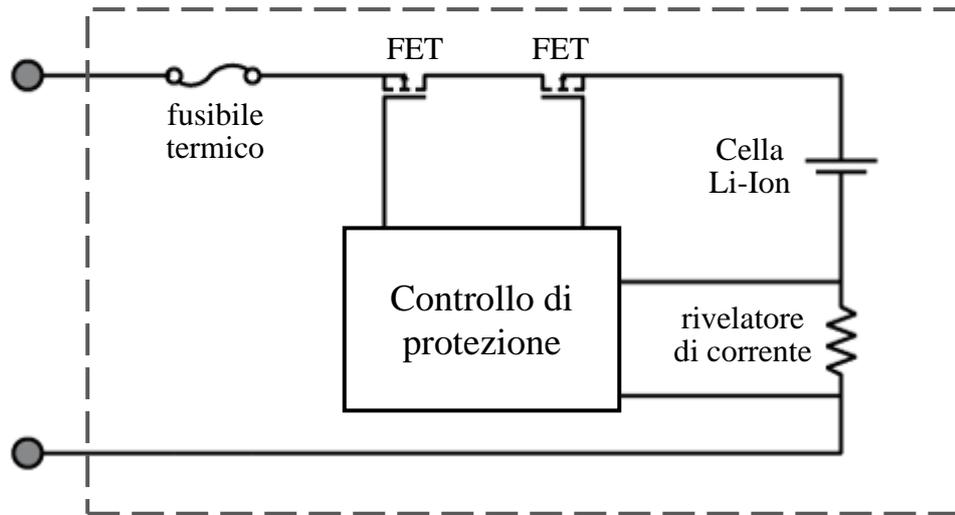


Figura 4.1 – Schema della struttura di una batteria Li-ion

protezione, della cella agli ioni di litio, un sensore di corrente che pilota il controllo di protezione e dei rispettivi collegamenti.

Tale configurazione può essere schematizzata con il circuito equivalente presente in figura 4.2 dove, oltre alla cella agli ioni di litio, è stata inserita in serie al percorso di carica della batteria una resistenza r_p con lo scopo di compensare gli altri elementi i quali dal punto di vista funzionale non sono rilevanti nel processo di carica ma la cui influenza sulla cella non può essere trascurata. Il valore di tale resistenza però è di difficile determinazione a priori e solitamente assume dei valore nel range tra 110 mΩ e 250 mΩ.

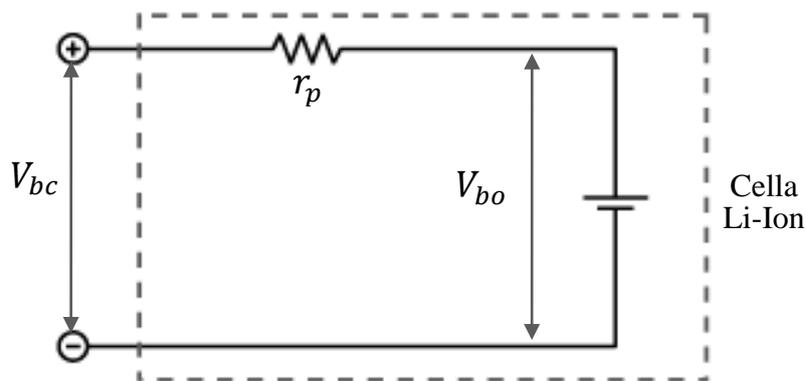


Figura 4.2 – Schema compatto di una batteria Li-ion

Come si può notare dallo schema in figura 4.2 la resistenza r_p induce una caduta di tensione proporzionale alla corrente passante su di essa la quale, essendo la resistenza r_p posta in serie alla batteria, equivale alla corrente di carica della batteria stessa. La presenza della resistenza r_p , quindi, comporta che la tensione del pacchetto batteria sia più elevata rispetto a quella a cui la batteria agli ioni di litio è effettivamente sottoposta durante il processo di carica.

Si può anche ribaltare il punto di vista e constatare come alla cella agli ioni di litio venga effettivamente applicata una tensione inferiore a quella ipotizzata teoricamente e quindi le performance del processo siano conseguentemente compromesse. Se per caricare un pacchetto batteria di questo genere si utilizza un sistema di caricabatterie a PLL come quello presentato nel capitolo precedente ne consegue che la tensione di batteria sia superiore a quella presente nella cella e di conseguenza il comparatore di fase di tale sistema rileva un errore di fase più piccolo di quanto dovrebbe essere. Al blocco di pompa di corrente quindi arriva un valore inferiore che genera una corrente di carica della batteria più piccola. Il funzionamento del sistema non è quindi compromesso ed il processo di carica avviene ugualmente correttamente, però le performance del sistema, soprattutto per quanto concerne la velocità di carica, certamente non sono ottimali. Volendo ottimizzare il sistema appare così chiaro che è necessario attuare una tecnica di compensazione della resistenza interna del pacchetto batteria al fine di raggiungere l'esatta tensione ai capi della cella agli ioni di litio e di conseguenza aumentare la velocità di ricarica.

Le discrepanze rispetto al modello ideale riscontrate finora si riferiscono essenzialmente alla struttura reale del pacchetto batteria. La cella agli ioni di litio, ovvero il cuore della batteria, è stata rappresentata da un modello semplificato comprendente una capacità ed una resistenza equivalente. Si vuole quindi valutare se tale modello semplificato è sufficientemente fedele nell'analisi del processo di carica di una batteria a ioni di litio.

Il modello completo del circuito per la batteria agli ioni di litio, oltre alla capacità equivalente C_b ed al generatore di tensione equivalente V_{bb} della cella della batteria agli ioni di litio, include la resistenza del pacchetto batteria r_p , una resistenza interna di carica r_c e una resistenza interna di scarica della batteria r_d , una resistenza interna di auto-scarica r_{sd} ed una costante di tempo del ritardo della reazione elettrochimica τ_b . In tale modello la resistenza interna di carica r_c e quella di scarica della batteria r_d sono collocate in parallelo e schematizzate con la presenza di due diodi contrapposti che fungono da interruttori in quanto tali reti sono operative solamente nel processo di carica o di scarica della batteria in maniera esclusiva. La resistenza interna di auto-scarica r_{sd} , invece, pur avendo dei valori molto bassi, è presente in serie alla capacità equivalente C_b della cella e risulta quindi sempre attiva nel processo. La figura 4.3 sottostante rappresenta appunto tale modello completo di una cella di una batteria agli ioni di litio.

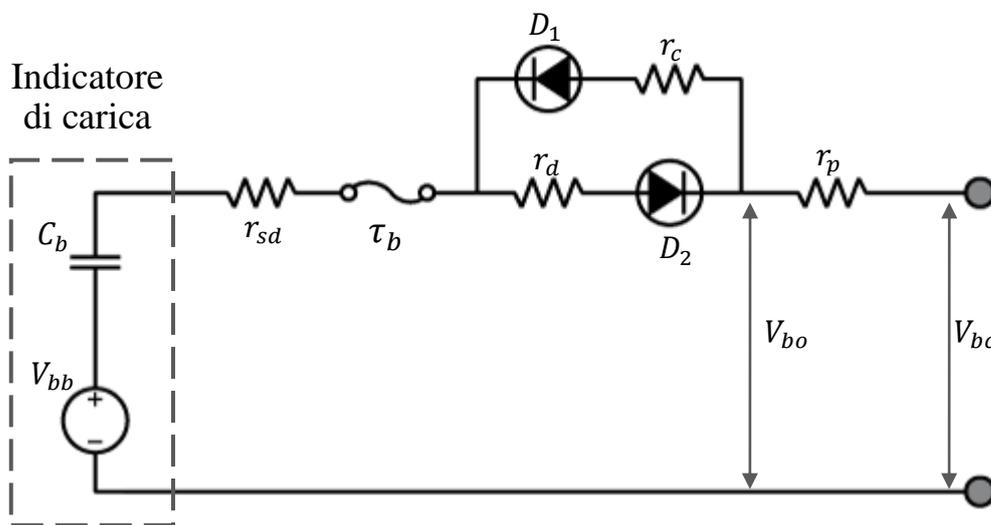


Figura 4.3 – Modello completo di una cella

Il miniblocco costituito dalla capacità equivalente C_b e dal generatore di tensione equivalente V_{bb} della cella funziona come un indicatore dello stato di carica della batteria agli ioni di litio – Stato-Of-Charge – SOC.

L'indicatore dello stato di carica è utile in quanto fornisce una relazione lineare tra l'indicatore dello stato di carica della batteria e la tensione a circuito aperto della cella. Sfruttando tale relazione nel momento in cui l'indicatore di carica segnala la carica completa (SOC = 100%) la tensione V_{bb} corrisponde con la tensione di lavoro della batteria.

Nell'analisi del caricabatterie basato sui PLL si considera solamente la fase di carica della batteria e quindi nel modello presentato si possono effettuare delle semplificazioni; il ramo corrispondente al processo di scarica costituito dalla resistenza interna di scarica r_d e dal diodo D_2 può essere così ignorato. La resistenza interna di auto-scarica r_{sd} , invece, assume valori molto piccoli rispetto agli altri in gioco e può anch'essa essere ignorata nell'analisi del processo di carica. Il modello semplificato risultante relativo al processo di carica della batteria è quindi quello qui riportato in figura 4.4.

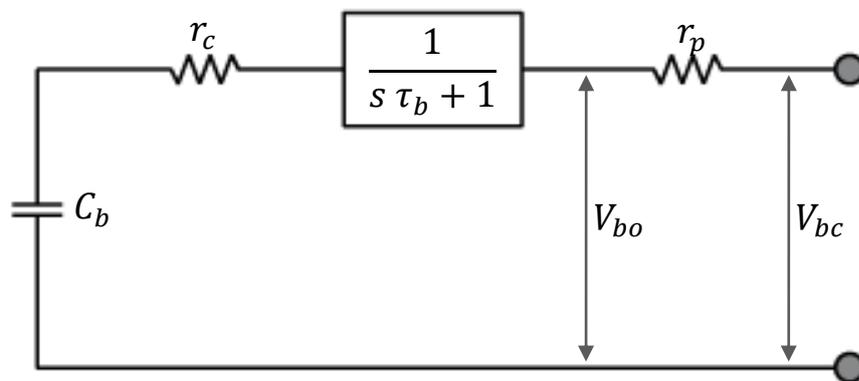


Figura 4.4 – Modello semplificato di una cella agli ioni di litio durante il processo di carica

Essendo l'analisi del sistema di caricabatterie a PLL limitata al processo di carica della batteria, la costante di tempo del ritardo della reazione elettrochimica τ_b può essere trascurata essendo di molti ordini di grandezza minore rispetto l'intervallo temporale del processo di carica completo. Con tale approssimazione il modello si semplifica ulteriormente e quindi la funzione di

trasferimento globale della cella agli ioni di litio durante il processo di carica può quindi essere rappresentata come

$$B(s) = \frac{V_{bo}(s)}{I_c(s)} = \frac{1 + sr_c C_b}{sC_b}$$

Tale funzione di trasferimento conferma la bontà del modello utilizzato per la cella. Nel tentativo di migliorare la struttura del caricabatterie a PLL precedentemente presentato l'attenzione deve quindi essere posta nella discrepanza tra la tensione ai capi della cella agli ioni di litio e quella ai capi del pacchetto batteria.

4.2 La compensazione del sistema di caricabatterie a PLL

Per migliorare le performance del sistema di carica nella struttura a PLL viene inserito un blocco sottrattore con la funzione di compensare la caduta di tensione dovuta alla resistenza r_p trascurata nel sistema presentato precedentemente. Nella figura 4.5 è rappresentato lo schema completo utilizzato per tale soluzione in cui il sistema è ora costituito dal comparatore di fase, la pompa di corrente, la batteria agli ioni di litio, un blocco sottrattore ed l'oscillatore controllato in tensione VCO. Rispetto allo schema generale di funzionamento del sistema presentato precedentemente di fatto il blocco dell'amplificatore differenziale

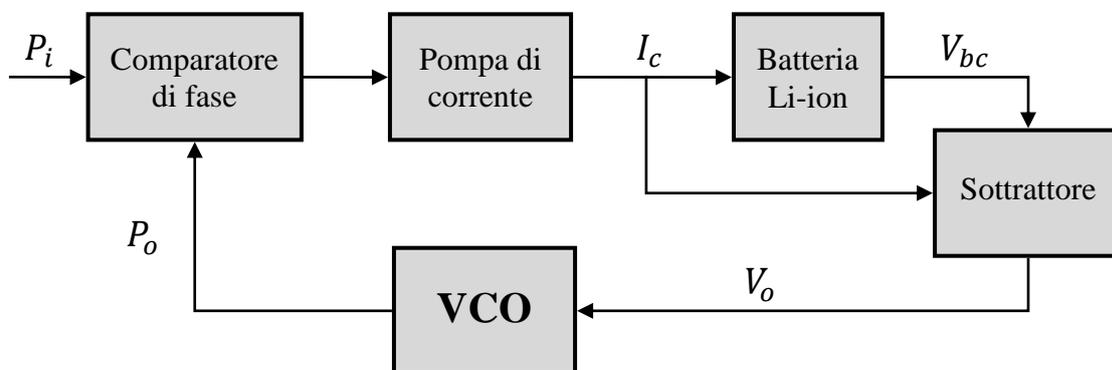


Figura 4.5 – Schema a blocchi di un sistema di caricabatterie a PLL compensato

viene sostituito dal nuovo blocco sottrattore il quale, posizionato dopo il blocco batteria riceve in ingresso sia la tensione V_{bc} rilevata ai capi della batteria che il valore della corrente I_c in ingresso alla batteria e generata dal blocco di pompa di corrente.

Il sottrattore ha il compito di compensare la caduta di tensione presente nella resistenza r_p per ottenere l'esatta tensione ai capi della cella Li-ion tramite la seguente relazione:

$$V_o = V_{bc} - r_p I_c = V_{bo}$$

dove V_o è la tensione di uscita del blocco sottrattore, V_{bc} è la tensione rilevata ai terminali della batteria e V_{bo} è l'effettiva tensione presente ai capi della cella Li-ion. Con tale tecnica è possibile quindi stimare l'effettiva tensione ai capi della cella e regolare la corrente di carica di conseguenza per migliorare sensibilmente la velocità di carica del sistema.

La struttura del caricabatterie basato su PLL è mantenuta inalterata rispetto a quella presentata precedentemente e quindi il funzionamento concettuale rimane inalterato; il comparatore di fase confronta il segnale di feedback P_o con il segnale di riferimento P_i generando un errore di fase P_e il quale va a pilotare il blocco di pompa di corrente che produce la corrente di carica I_c . Tale corrente alimenta il processo di carica della batteria. La tensione ai capi della batteria viene quindi utilizzata, assieme alla corrente di carica I_c , dal blocco sottrattore per generare la tensione V_o che va a pilotare l'oscillatore controllato in tensione VCO secondo le equazioni riportate sopra. L'oscillatore quindi genera il segnale di feedback P_o che va a chiudere la rete di retroazione del sistema. Il funzionamento concettuale, così come le differenti fasi di carica, sono quindi analoghe a quanto visto in precedenza.

Anche per quanto concerne la stabilità del sistema si possono effettuare delle considerazioni analoghe a quelle già effettuate sul sistema di caricabatterie a

PLL presentato nel capitolo precedente. La funzione di trasferimento globale del caricabatterie a PLL - $T(s)$ - può essere scritta nella forma:

$$T(s) = \frac{V_b(s)}{f_i(s)} = \frac{sr_r C_b K + K}{s^2 C_b \tau_f + s(C_b + r_r C_b K_f) + K_f}$$

e l'equazione caratteristica:

$$s^2 C_b \tau_f + s(C_b + r_r C_b K_f) + K_f$$

Tali equazioni garantiscono la stabilità del sistema il quale, come preventivato, conserva tutte le sue caratteristiche di stabilità come discusso nel capitolo precedente.

4.3 Il prototipo del caricabatterie a PLL compensato

Si procede quindi con la definizione di un prototipo di caricabatterie compensato basato sulla struttura PLL per batterie agli ioni di litio. Il diagramma circuitale proposto è rappresentato nella figura 4.6.

La struttura è composta da un PLL IC 4046, un blocco a pompa di corrente, la batteria agli ioni di litio e due sottrattori. Il PLL IC 4046 è stato inserito per realizzare i blocchi di comparatore di fase e di oscillatore controllato in tensione. Il blocco a pompa di corrente invece è costituito da un amplificatore operazionale e da un MOSFET di potenza, oltre alle resistenze R_f ed R_1 e dal condensatore C_f . I due blocchi sottrattori sono costituiti ognuno da un amplificatore operazionale e dalle relative resistenze al fine di ottenere il guadagno desiderato.

La corrente di uscita dal blocco di pompa di corrente può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$I_c = \frac{V_{pe}}{R_1}$$

dove I_c è la corrente di carica della batteria e V_{pe} è la tensione associata all'errore di fase.

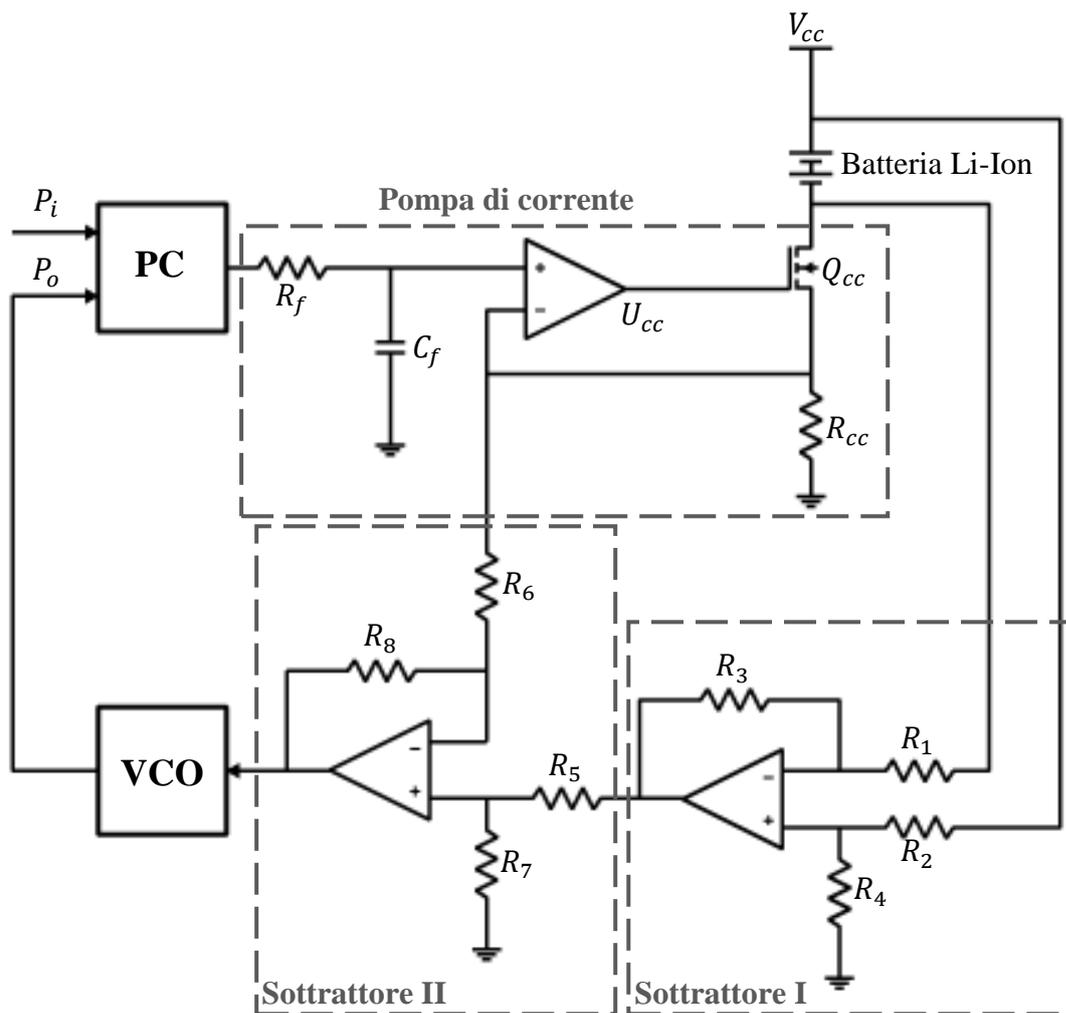


Figura 4.6 – Prototipo di un caricabatterie a PLL con compensazione della resistenza della batteria

Dallo schema di figura 4.6 si nota chiaramente che la corrente di carica I_c è direttamente controllata proporzionalmente dalla tensione V_{pe} , la quale è a sua volta controllata direttamente in maniera proporzionale dall'errore di fase p_e . Inoltre mentre la batteria viene ricaricata dalla corrente I_c , la tensione a circuito chiuso V_{b0} , ovvero la tensione percepita ai capi della batteria, viene misurata dal primo blocco sottrattore I. Questo primo blocco sottrattore I è costruito da un amplificatore operazionale e quattro resistenze R_1, R_2, R_3 ed R_4 , così come il secondo blocco sottrattore II da un amplificatore operazionale e dalle quattro resistenze R_5, R_6, R_7 e R_8 .

Siano ora verificate le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}R_1 = R_2 = R & \quad R_3 = R_4 = k' \cdot R \\R_6 = R_7 & \quad R_5 = R_8 \\ \frac{R_8}{R_6} = k' \cdot \frac{r_p}{R_1}\end{aligned}$$

Allora la tensione in uscita del blocco sottrattore può essere riscritta come:

$$V_o = k' \cdot (V_{bc} - r_p I_c) = k' \cdot V_{bo}$$

Tale relazione mette in evidenza come la tensione ai capi della cella agli ioni di litio V_{bo} può essere ottenuta dal sistema formato dai due sottrattori e la tensione di uscita dal secondo sottrattore V_o sia direttamente proporzionale alla tensione V_{bo} tramite il fattore k' .

Di seguito, la tensione di uscita di tale blocco sottrattore V_o viene utilizzata per pilotare l'oscillatore controllato in tensione VCO al fine di portare la frequenza di feedback f_o sempre più vicina alla tensione di ingresso f_1 e quindi di ridurre l'errore di fase/frequenza fino a zero.

4.4 Le performance del sistema compensato

Si vuole ora valutare il miglioramento delle performance del sistema di caricabatterie con l'introduzione della variante di compensazione della resistenza. In figura 4.7 sono riportati gli andamenti della tensione ai morsetti della batteria (in alto) e la corrente di carica (in basso) di una batteria agli ioni di litio nei due differenti sistemi. L'acronimo PLBC, come già indicato in precedenza, indica il sistema di caricabatterie a PLL – Phase Locked Battery Charger – mentre l'acronimo RC-PLBC indica lo stesso sistema con la compensazione di resistenza del pacchetto batteria – Resistance Compensated Phase Locked Battery Charger. Quest'ultimo presenta una velocità di carica superiore rispetto al sistema PLBC di circa il 18%.

E' importante notare come la scansione temporale delle due fasi di carica, escludendo temporaneamente dall'analisi del processo di carica la fase flottante, sia differente nei due sistemi e ciò si vede in maniera molto chiara confrontando l'andamento della corrente di carica nella figura 4.7 in basso.

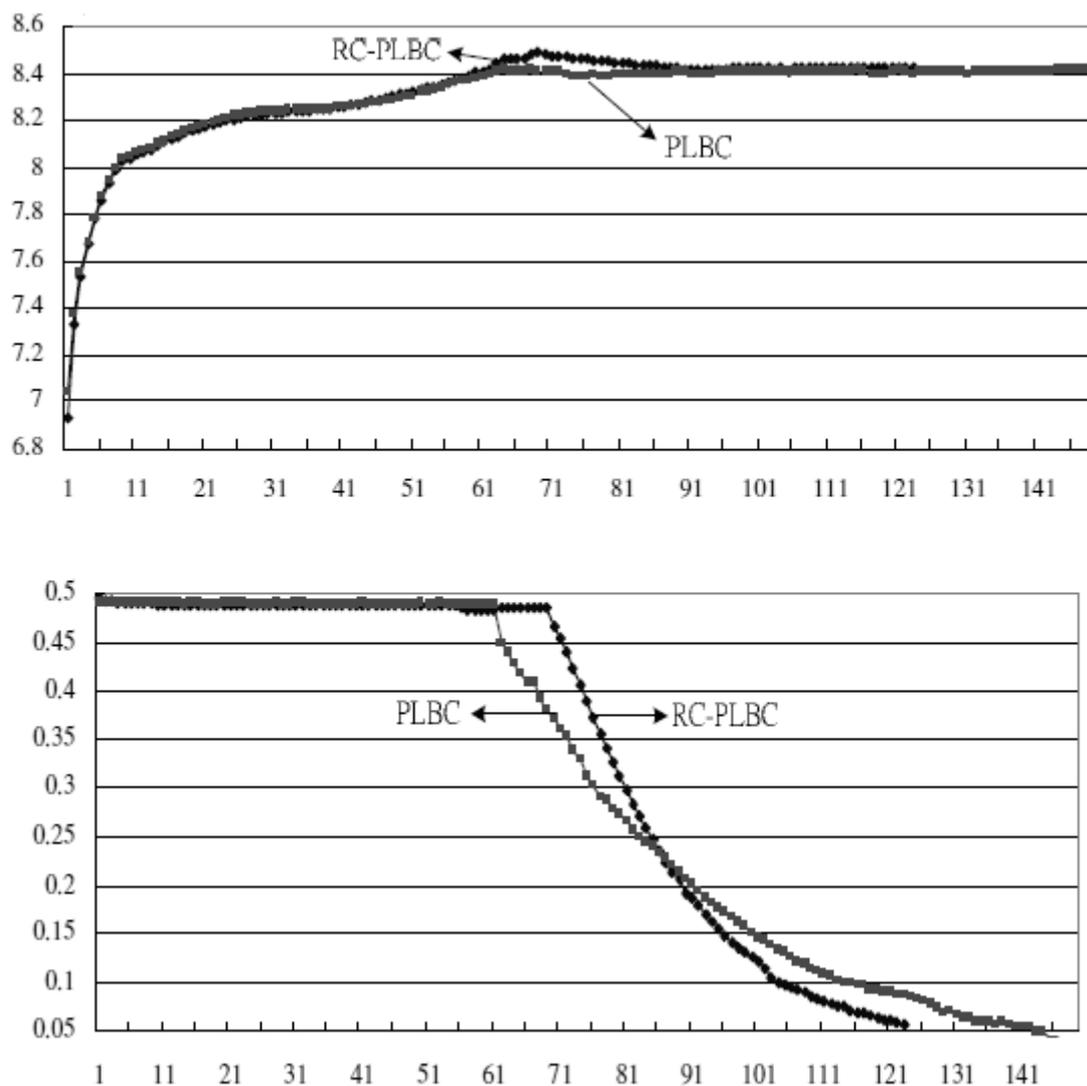


Figura 4.7 – La tensione ai capi della batteria e la corrente di carica di una batteria agli ioni di litio nei sistemi PLBC e RC-PLBC [13]

Nel sistema con la compensazione di resistenza la fase a corrente di carica costante ha una durata sensibilmente maggiore rispetto al sistema PLBC. Durante la fase a corrente variabile, la corrente cala progressivamente in maniera più marcata e di conseguenza anche la fase a corrente variabile del

processo di carica ha una durata inferiore. Questa differenza di comportamento tra i due sistemi è da imputarsi al fatto che, nel sistema non compensato, la tensione di batteria rilevata è maggiore del reale e quindi durante il processo di carica a corrente costante in cui la tensione cresce progressivamente il sistema “stacca” in maniera anticipata in quanto crede di essere giunto al valore di tensione massimo. In un certo senso si perde una parte del processo di carica a corrente costante e di conseguenza le performance del sistema risultano compromesse. Nella fase a corrente variabile, in cui la tensione alla batteria rimane pressoché costante, la corrente di carica nel sistema con compensazione di resistenza cala molto più rapidamente rispetto al sistema PLBC perché il processo di carica è più avanzato. Si ricorda inoltre che nei sistemi di carica CC-CV, a parità di sistema, ad uno stadio di carica a corrente costante più lungo corrisponde uno stadio a corrente variabile più breve.

Dalla figura 4.7 nel grafico in alto raffigurante la tensione ai capi della batteria nel processo di carica si nota come, nella fase finale del processo a corrente costante in cui la tensione tende a crescere, tale tensione superi il valore nominale della batteria nel sistema di carica a PLL compensato. Il valore della tensione ai capi della batteria successivamente nella fase di carica a corrente variabile decresce leggermente fino a tendere alla tensione nominale della batteria. Questo fenomeno, che nel sistema di carica a PLL presentato nel capitolo precedente a cui è confrontato il sistema non avviene, induce a pensare che ci possa essere una sovraccarica di tensione nel processo.

Il fenomeno appena descritto invece non è affatto inaspettato; rappresenta anzi in maniera lampante l'effetto della compensazione di resistenza la quale ha lo scopo di sottoporre il pacchetto della batteria ad una tensione leggermente superiore al fine di ottenere ai capi della cella agli ioni di litio la tensione voluta. Quello che si vuole ottenere con la compensazione della resistenza del pacchetto della batteria infatti è una tensione ai capi della cella che sia pari a quella

nominale della batteria. Nel sistema di caricabatterie a PLL senza compensazione è la tensione ai morsetti della batteria ad essere uguale alla tensione nominale e di conseguenza la tensione ai capi della cella risulta inferiore.

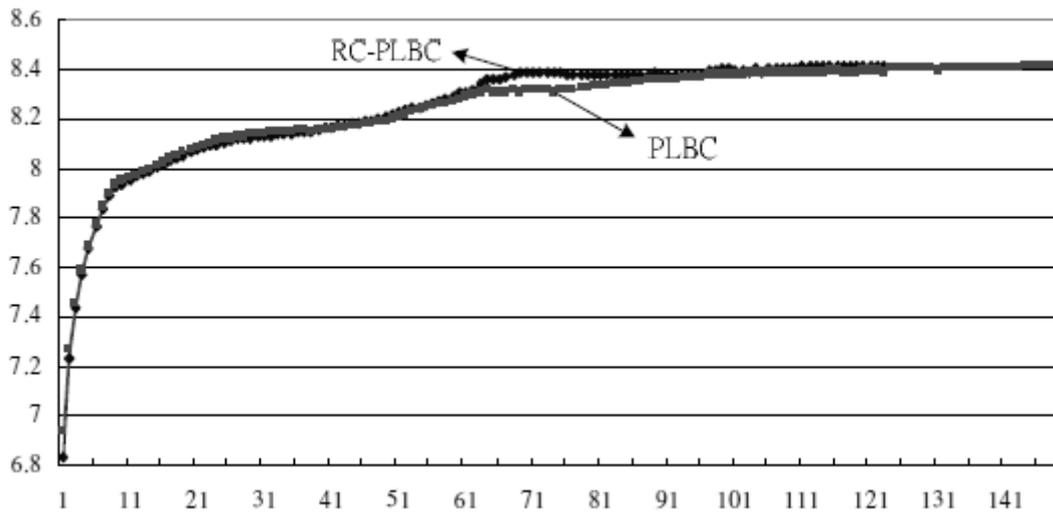


Figura 4.8 – La tensione ai capi della cella della batteria agli ioni di litio nei sistemi PLBC e RC-PLBC [13]

Nel sistema di caricabatterie a PLL con compensazione della resistenza del pacchetto di batteria, quindi, seppure la tensione applicata alla batteria supera il valore nominale non avviene un sovraccarico di tensione. In figura 4.8 è rappresentato l'andamento della tensione effettiva ai capi della cella e tale tensione non supera mai il valore nominale. Nel sistema PLBC, invece, tale tensione appare nella fase centrale di carica inferiore al valore ottimale ed è per questo che il sistema RC-PLBC risulta ottimizzato rispetto al precedente per quanto concerne i tempi di carica.

Capitolo 5

Il sistema di caricabatterie a PLL con carica impulsiva

5.1 Il processo di carica impulsivo

Per migliorare ulteriormente le performance del sistema di caricabatterie a PLL introduciamo il concetto di carica impulsiva. Non si tratta quindi di migliorare ulteriormente le performance del sistema di caricabatterie ottimizzandolo ma attuando un processo di carica più efficiente. Il vantaggio di tale tecnica è da ricercarsi nell'ottimizzazione dei processi chimici che avvengono all'interno della batteria durante la fase di carica. La tecnica si basa sul fornire un impulso di corrente alla batteria per un tempo massimo di un secondo seguito da un periodo di riposo della durata di alcuni millisecondi. Come avviene nel processo di carica a corrente costante, gli ioni vengono generati da un elettrodo nel periodo di carica e devono muoversi fino all'altro elettrodo. Se una corrente costante è applicata per un periodo di tempo significativo, un gradiente di concentrazione di ioni si accumula a causa dei limiti di trasporto di massa all'interno della batteria. Questo effetto comporta una bassa efficienza di carica che genera calore, il quale riduce capacità della batteria ed il suo ciclo di vita. Interrompendo periodicamente il flusso di carica si permette agli ioni di

diffondersi e distribuirsi in modo più uniforme in tutta la batteria. Di fatto si consente alla concentrazione di ioni di tornare a livelli normali di routine riducendo al minimo gli effetti negativi osservati con una carica a corrente costante.

Tale tecnica si può affinare ed ottimizzare ulteriormente aggiungendo un impulso di scarica durante il periodo di riposo. Dopo l'impulso di carica temporalmente piuttosto lungo c'è un breve periodo di riposo seguito da un impulso di scarica di brevissima durata e da un altro breve periodo di riposo. La sequenza poi si ripete periodicamente. L'impulso di scarica, seppure di durata molto limitata ha un'intensità circa 2,5 volte la grandezza dell'impulso di carica. L'aggiunta del singolo impulso di scarica il quale ovviamente appare negativo rispetto all'impulso di carica accelera ulteriormente il bilanciamento della concentrazione di ioni e attenua alcuni effetti negativi presenti nelle reazioni chimiche periferiche della batteria.

5.2 Il caricabatterie a PLL con carica impulsiva

Nell'applicazione di questi concetti in un caricabatterie basato sulla struttura a PLL si fa riferimento solamente alla strategia di procedere ad una carica impulsiva intervallata a degli istanti di pausa. Non si prende quindi in considerazione l'ipotesi di inserire degli impulsi negativi. Nel confronto tra il processo di carica a corrente costante ed il processo di carica ad impulsi di corrente si nota come, per un primo periodo di circa 40 minuti, la situazione nella cella agli ioni di litio sia pressoché simile. Dopo i primi 40 minuti invece la pressione interna tende rapidamente a salire. Utilizzando un processo di carica ad impulsi di corrente, tale pressione interna è minore rispetto al processo a corrente costante in quanto la diffusione degli ioni avviene in maniera più veloce ed efficiente. Questo fenomeno provoca un aumento della temperatura nelle celle della batteria riducendo di fatto la capacità di carica della batteria ed il suo

ciclo di vita. Per tali motivazioni i processi di carica a corrente impulsiva sono ampiamente utilizzati nei moderni sistemi di carica delle batterie.

Per quanto concerne il sistema di carica delle batterie agli ioni di litio basati su PLL presentati nei capitoli precedenti appare chiaro come la fase di carica a corrente variabile possa essere sostituita da una fase di carica a corrente impulsiva a duty cycle variabile al fine di perfezionare ulteriormente le performance della carica. Per l'applicazione di tale strategia di carica si utilizza uno schema del PLL leggermente differente rispetto ai precedenti il quale viene comunemente detto PLL a pompa di carica. Nella struttura del PLL a pompa di carica, il cui schema a blocchi è rappresentato nella figura 5.1, i segnali di riferimento e di feedback vengono confrontati dal comparatore di fase PC seguito da un blocco con la funzione di pompa di carica. Di seguito poi è presente il blocco con la funzione di filtro passa basso che comprende la batteria agli ioni di litio da ricaricare. L'anello si chiude quindi con l'oscillatore controllato in tensione VCO.

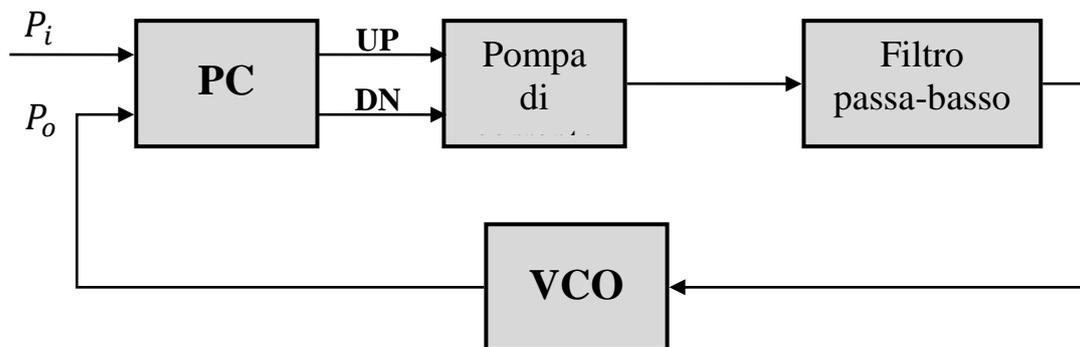


Figura 5.1 – Struttura di un PLL a pompa di carica

Il funzionamento concettuale di tale sistema a PLL a pompa di carica è rapidamente descritto: in primo luogo, il comparatore di fase confronta la fase di ingresso P_i con la fase di feedback P_o generando, tramite le due uscite UP e DN del comparatore, il segnale che va a pilotare il blocco di pompa di carica il quale successivamente va a generare la corrente di pompa di carica I_p . Di seguito, poi,

questa corrente I_p regola la tensione V_o dell'oscillatore controllato in tensione VCO passando attraverso il filtro passa basso e quindi procedendo al processo di carica della batteria. Analogamente infatti a quanto visto in precedenza la batteria agli ioni di litio, assieme ad altre componenti, fa parte del blocco qui schematizzato genericamente dal filtro passa basso. L'oscillatore controllato in tensione quindi genera la frequenza di feedback P_o che chiude l'anello di retroazione e tende a ridurre l'errore di fase e di frequenza portando all'aggancio il sistema.

Per quanto concerne il comparatore di fase PC, il suo funzionamento nello stadio di aggancio di fase è schematizzato nel diagramma di stato di figura 5.2 dove sono riportati i tre possibili stati del sistema. Durante l'aggancio di fase gli stati possibili sono solamente tre poiché non è possibile che lo stato UP e lo stato DN siano entrambi accesi simultaneamente. Il sistema è sensibile ai fronti d'onda di salita dei segnali P_o e P_i ed in corrispondenza di tali fronti il sistema si aggiorna allo stato successivo rimanendo insensibile ai fronti d'onda di discesa. Nello stato in cui entrambi i segnali sono off la presenza di un fronte di salita su P_i o P_o porta il sistema rispettivamente allo stato UP o DN. Nello stato UP un fronte di salita di P_i fa rimanere il sistema inalterato mentre un fronte di P_o riporta il sistema allo stato off. Nello stato DN, invece, avviene la situazione duale ovvero solamente un fronte di salita di P_i riporta il sistema allo stato off. I segnali UP e DN vanno poi a comandare il blocco di pompa di carica.

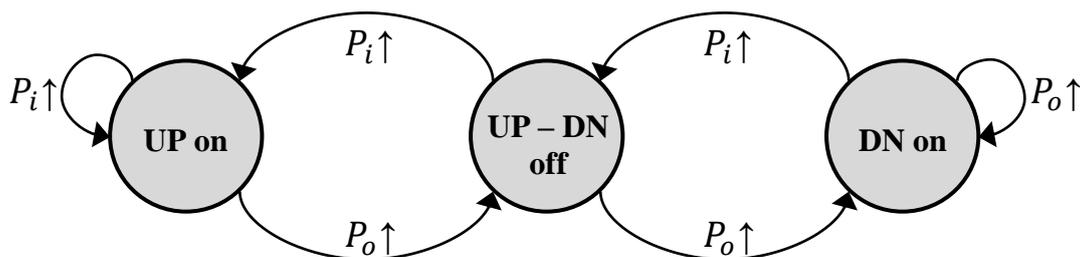


Figura 5.2 – Diagramma di stato del comparatore di fase

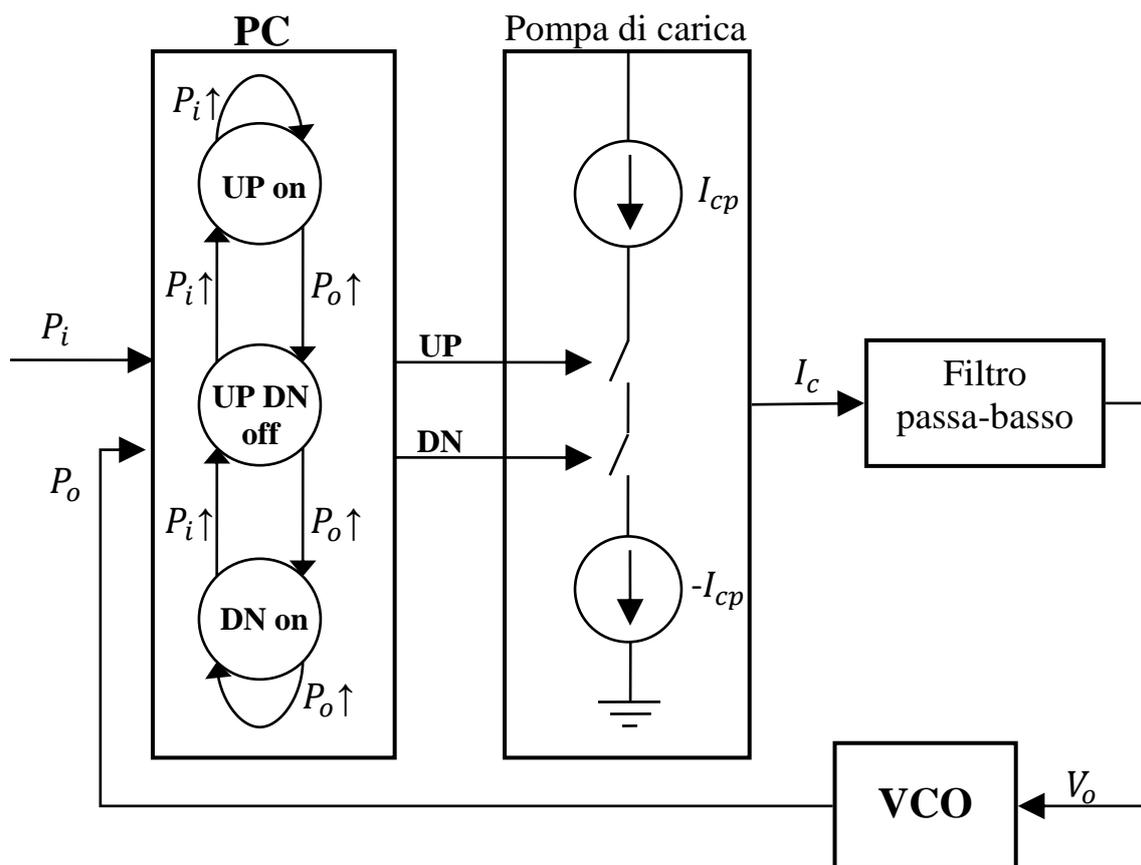


Figura 5.3 –Principio di funzionamento del PLL a pompa di carica

Nella figura 5.3 è rappresentato il principio di funzionamento di un sistema PLL a pompa di carica durante lo stadio di aggancio di fase. Il blocco del comparatore di fase PC è schematizzato tramite il diagramma di stato di figura 5.2 ed il blocco di pompa di carica tramite il principio di funzionamento in cui i segnali UP e DN fungono da interruttori per la generazione di una corrente impulsiva. Da tale rappresentazione si evince che quando la fase di feedback P_o è in ritardo rispetto alla fase di riferimento in ingresso P_i , il segnale di controllo all'uscita è mantenuto al livello UP per un tempo corrispondente alla differenza di fase. Durante questo stato il blocco di pompa di carica eroga una corrente costante pari a I_{cp} . Quando al contrario la fase di feedback P_o è in anticipo rispetto alla fase di riferimento in ingresso P_i , avviene la situazione duale ed all'uscita è il segnale di controllo DN ad essere mantenuto per un tempo corrispondente alla differenza di fase. Quando si verifica tale situazione il

blocco di pompa di carica eroga una corrente costante pari a $-I_{cp}$. Nel momento in cui il segnale di feedback P_o ed il segnale di ingresso P_i sono perfettamente sincroni, entrambe le uscite del comparatore di fase UP e DN rimangono spente, l'uscita del PC diviene come un circuito aperto e la tensione V_o che guida l'oscillatore VCO viene mantenuta costante poiché si è verificato, oltre all'aggancio di frequenza, anche l'aggancio di fase tra il segnale di feedback P_o ed il segnale di ingresso P_i .

Nella figura 5.4 qui di seguito sono rappresentate la corrente I_c erogata dal blocco pompa di carica e la tensione V_o dell'oscillatore in funzione delle diverse configurazioni di ingresso ovvero dei segnali P_o e P_i . Nella prima parte, indicata in figura con la lettera a, il segnale di feedback P_o è in ritardo rispetto al segnale di riferimento P_i e di conseguenza viene erogata la corrente I_c per un tempo T_{on} corrispondente al tempo che intercorre tra il fronte d'onda di salita del segnale P_i e il fronte d'onda di salita del segnale P_o . Poi la corrente di uscita I_c viene mantenuta spenta per un tempo T_{off} ovvero fintanto che non si incontra un altro fronte d'onda di salita.

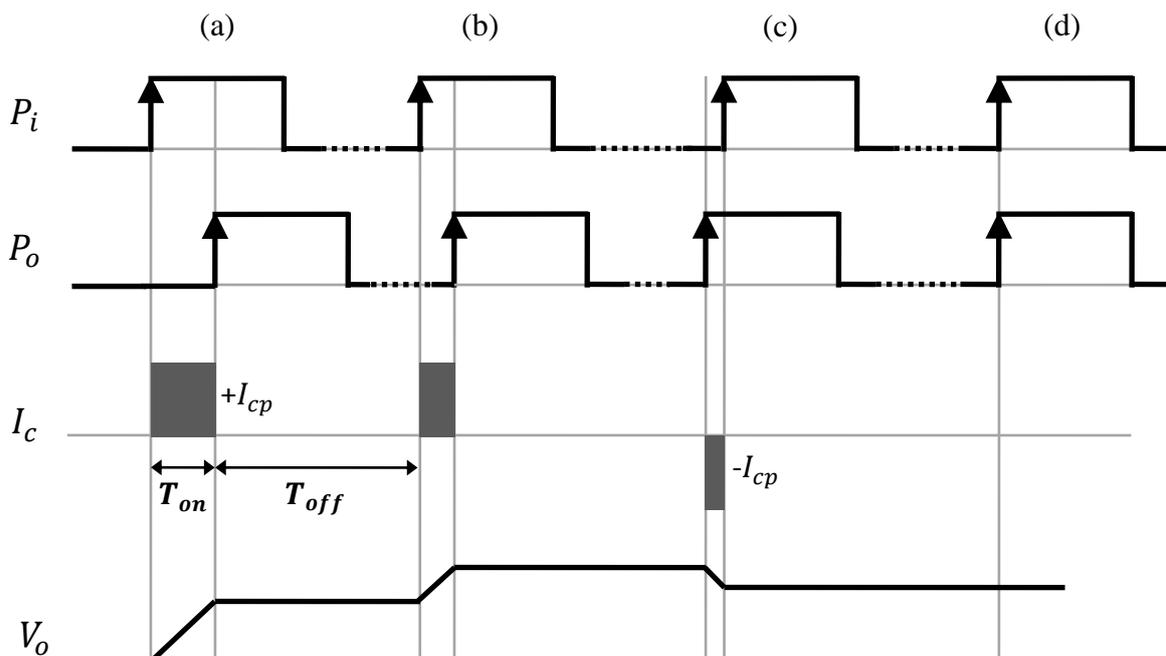


Figura 5.4 – Forme d'onda tipiche in un PLL a pompa di carica

Durante la fase di aggancio di frequenza, l'uscita del comparatore di fase è mantenuta continuamente al livello massimo oppure al livello minimo se la frequenza di riferimento è rispettivamente più grande oppure più piccola della frequenza di feedback. Nella prima fase di carica quindi la corrente di carica è costantemente al valore massimo I_{cp} e si verifica quindi la fase di carica a corrente costante. Di conseguenza la tensione V_o , che pilota l'oscillatore controllato in tensione VCO e corrisponde alla tensione presente ai capi della cella agli ioni di litio, cresce progressivamente.

Nella seconda fase di carica corrispondente all'aggancio di fase dei segnali si parte da una differenza di fase massima che poi si riduce progressivamente man mano che procede il processo di aggancio di fase fino ad un perfetto aggancio corrispondente alla carica completa della batteria. In questo periodo man mano che la differenza di fase si riduce la durata degli impulsi di corrente si riduce proporzionalmente; si verifica così la fase di carica a corrente impulsiva variabile con un duty cycle sempre più piccolo.

Quando si verifica anche l'aggancio di fase ovvero la fase di feedback P_o è pressoché uguale alla fase del segnale di riferimento P_i , la carica risulta completata e il processo di carica diviene flottante. Al termine di questa fase, infatti, la carica viene interrotta al fine di non stressare la batteria. Nel momento in cui, a causa dell'utilizzo della batteria stessa oppure anche a causa del fenomeno di autoscarica, la capacità di carica della batteria cala non si riprende immediatamente il processo di carica ma si preferisce attendere che la corrente da applicare superi una certa soglia altrimenti il processo di carica sarebbe praticamente sempre attivo. Tale valore di soglia, nel caso di un processo di carica impulsiva, viene rapportato al duty cycle della corrente impulsiva applicata. Quando infatti il duty cycle raggiunge valori inferiori al 5% si passa allo stato flottante.

5.3 Il prototipo di caricabatterie a PLL a corrente impulsiva

In questa sezione viene presentato un prototipo circuitale di un sistema di carica per batterie agli ioni di litio con struttura di controllo di carica a PLL e processo di carica impulsivo. In figura 5.5 è rappresentato tale prototipo costituito dai blocchi del comparatore di fase e frequenza e dell'oscillatore controllato in tensione, un blocco di amplificazione di corrente, la batteria agli ioni di litio ed un blocco di amplificazione di tensione. Tale circuito è realizzato utilizzando un amplificatore operazionale ed un MOSFET per il blocco di amplificazione di corrente ed un ulteriore operazionale per il blocco di amplificazione di tensione. Il blocco di comparazione di fase e frequenza, così come l'oscillatore controllato

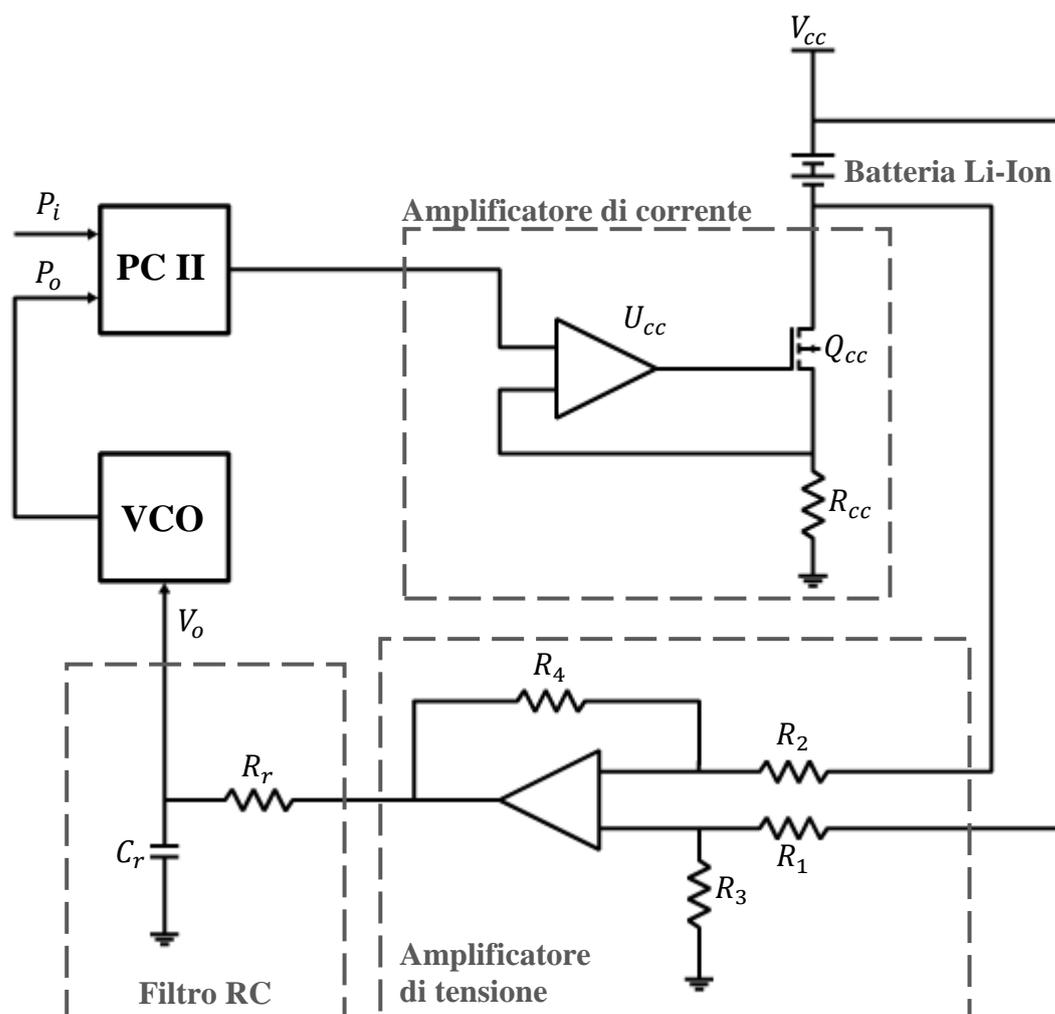


Figura 5.5 – Prototipo di un caricabatterie a PLL a pompa di carica

in tensione, può essere realizzato utilizzando un integrato che racchiuda al suo interno entrambi i blocchi. Si può, ad esempio, utilizzare un PLL IC 4046 il quale è uno dei PLL integrati tra i più diffusi e di semplice utilizzo e che è già stato utilizzato nei prototipi ai capitoli precedenti. Il circuito integrato PLL IC 4046 si compone al suo interno di due differenti comparatori di fase PC, denominati di tipo I e di tipo II. Il comparatore di fase di tipo I è costituito da una porta OR-esclusiva che confronta direttamente i due segnali in ingresso. Nel prototipo invece si utilizza un comparatore di fase di tipo II il quale viene definito come un edge-controlled digital memory network ed è composto da quattro stadi di flip-flop, una porta di controllo ed un circuito di uscita a tre stati che comprende driver di tipo p-MOS e n-MOS con un nodo di uscita comune. Quando il driver p-MOS o quello n-MOS sono ON tirano la tensione di uscita V_p rispettivamente in alto alla tensione di alimentazione V_{CC} oppure verso il basso a 0 Volt. All'interno dell'integrato PLL IC 4046 è presente anche l'oscillatore controllato in tensione VCO che può essere utilizzato nel sistema. In figura 5.6 è possibile notare il generico schema di funzionamento di un siffatto comparatore di fase PC II dove si possono notare le due uscite Up e Down del primo blocco di comparatore di fase e frequenza e di seguito tali uscite che vanno a pilotare un sistema a Mosfet che genera l'uscita di corrente richiesta.

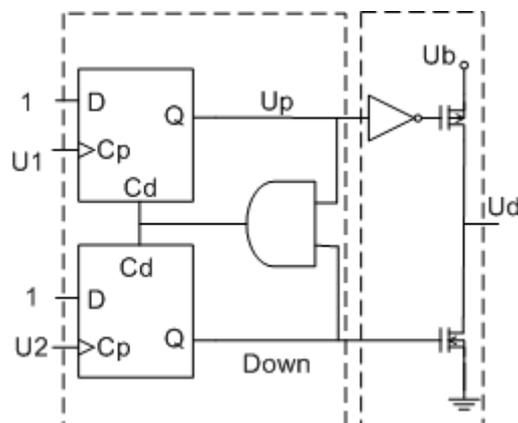


Figura 5.6 – Schema di funzionamento un PC di tipo II

A valle di questo blocco, nel prototipo del sistema di caricabatterie con processo di carica impulsivo, è quindi presente un convertitore tensione-corrente per trasferire la tensione V_p di pompaggio in una congrua corrente di carica I_p e realizzare così la funzione del blocco di pompa di carica e dell'amplificatore di corrente.

Tali blocchi possono essere realizzati congiuntamente utilizzando un unico amplificatore operazionale U_{cc} , un Mosfet di potenza Q_{cc} e una resistenza R_{cc} . La corrente di carica della batteria agli ioni di litio può essere scritta nella forma:

$$I_c = \frac{V_p}{R_{cc}}$$

In questo modo il guadagno globale dei due blocchi di pompa di carica e di amplificazione di corrente può essere scritto come:

$$K_d \cdot K_{ca} = \frac{V_{p,max}}{2\pi \cdot R_{cc}}$$

dove $V_{p,max}$ è il valore massimo assunto dalla tensione V_p . Tale valore massimo solitamente è uguale alla tensione di alimentazione V_{cc} e di conseguenza l'equazione del guadagno può essere riscritta come:

$$K_d \cdot K_{ca} = \frac{V_{cc}}{2\pi \cdot R_{cc}}$$

Il blocco di amplificazione di tensione ha la funzione di fornire all'oscillatore controllato in tensione un'adeguata tensione di controllo partendo dalla tensione V_b rilevata ai capi della batteria. Analogamente a quanto visto nei capitoli precedenti, tale blocco è costituito da un amplificatore operazionale U_{va} e da quattro opportune resistenze R_1 , R_2 , R_3 ed R_4 al fine di ottenere una relazione lineare tra le due tensioni. La tensione di controllo dell'oscillatore V_o in uscita da tale blocco può infatti essere scritta nella forma:

$$V_o = V_{b+} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{R_2 + R_4}{R_2} - V_{b-} \cdot \frac{R_4}{R_2}$$

dove V_{b+} e V_{b-} sono rispettivamente le tensioni al morsetto positivo ed al morsetto negativo della batteria agli ioni di litio. La tensione globale ai capi della batteria è quindi $V_b = V_{b+} - V_{b-}$.

Imponendo la condizione $R_1 = R_2 = R_a$ ed $R_3 = R_4 = R_b$ la formulazione della tensione V_o può essere riscritta come:

$$V_o = V_b \cdot \frac{R_a}{R_b}$$

Di conseguenza anche il guadagno del blocco di amplificazione di tensione può essere scritto in maniera compatta nella formula:

$$K_{va} = \frac{R_a}{R_b}$$

Come è già stato notato nei capitoli precedenti per gli altri sistemi, il blocco dell'oscillatore controllato in tensione ha un guadagno lineare definito come:

$$K_{vco} = \frac{f_{o,max} - f_{o,min}}{V_{o,max} - V_{o,min}}$$

dove $f_{o,max}$ ed $f_{o,min}$ sono rispettivamente la frequenza massima e minima in uscita all'oscillatore; $V_{o,max}$ e $V_{o,min}$ invece sono le tensioni massime e minime in ingresso all'oscillatore. Solitamente, al fine di ottimizzare il sistema, la tensione massima è pari a V_{cc} mentre la tensione minima è pari a zero. Con questa scelta il guadagno dell'oscillatore controllato in tensione VCO può essere riscritto nella forma:

$$K_{vco} = \frac{f_{o,max} - f_{o,min}}{V_{cc}}$$

Con tali premesse appare chiaro come si mantenga la stessa struttura di controllo a PLL presentata precedentemente. La modifica sostanziale di questo sistema risiede nell'utilizzo diretto della corrente in uscita al comparatore PC di tipo II, senza passare per il valore medio tramite un filtro RC come avveniva nei sistemi precedenti, e quindi iniettando direttamente alla batteria agli ioni di litio una corrente di carica impulsiva.

5.4 Considerazioni sulle performance

Nella figura 5.7 sono riportati gli andamenti della corrente di carica - in basso - e della tensione - in alto - di una batteria agli ioni di litio durante il processo di carica impulsivo secondo la struttura a PLL a pompa di carica presentata precedentemente. Tali andamenti riportati nell'esempio in figura 5.7 si riferiscono ad una batteria agli ioni di litio costituita da una singola cella agli ioni di litio da 4.2 V per una capacità di carica di 700 mAh.

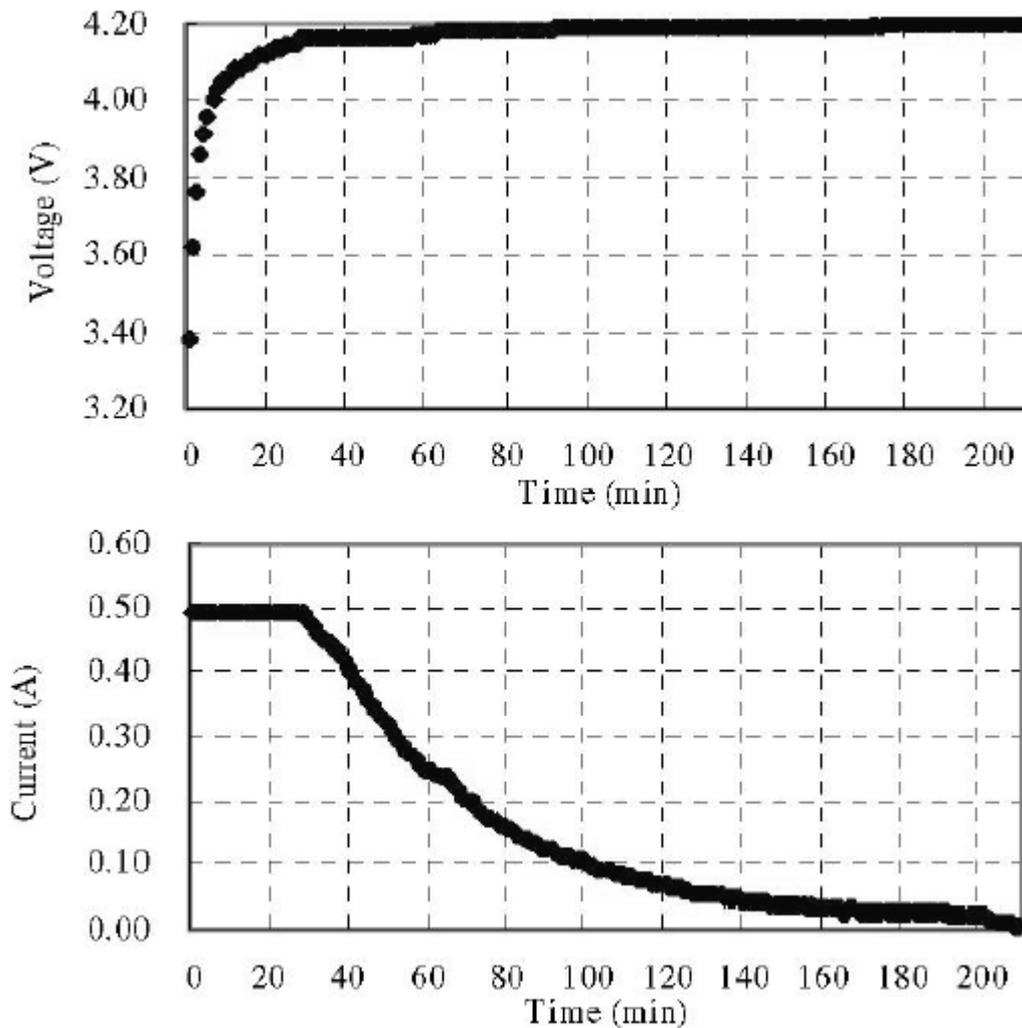


Figura 5.7 – Il profilo del valore medio della corrente di carica (in basso) e della tensione (in alto) di una batteria agli ioni di litio da 700mAh in un processo di carica impulsivo con struttura a PLL[17]

Per quanto concerne la corrente di carica, essendo di natura impulsiva, ovviamente in figura 5.7 ne è rappresentato il valore medio. Si notano in maniera molto distinta le tre fasi del processo di carica; la prima fase, corrispondente allo stato di aggancio di frequenza nel PLL, è caratterizzato da una corrente di carica costante a cui corrisponde un rapido innalzamento della tensione ai capi della batteria agli ioni di litio.

In corrispondenza dell'aggancio di frequenza avviene poi il passaggio alla fase ad aggancio di fase il cui il valore della corrente di carica decresce repentinamente e divenendo appunto impulsiva con un duty cycle variabile. Durante questo stadio la tensione ai capi della batteria rimane pressoché costante avendo già raggiunto il valore di lavoro. Il processo di carica impulsiva variabile continua fintanto che la batteria non risulta completamente carica e si entra nello stadio di carica flottante. Tale stadio, che risulta tagliato nella rappresentazione di figura 5.7, si manifesta quando il duty cycle della forma d'onda della corrente di carica è minore del 5%. Analizzando quindi la figura 5.7 il sistema si comporta correttamente come un caricabatterie di tipo CC-CV e quindi il controllo del processo di carica tramite la struttura a PLL si riconferma valido.

Molto interessante è andare a valutare in dettaglio l'andamento del segnale di riferimento P_i , del segnale di feedback P_o e della corrente di carica della batteria agli ioni di litio I_c in diversi momenti del processo al fine di distinguere in funzione di tali andamenti le diverse fasi del processo di carica. Nella figura 5.8 presente nella pagina successiva sono riportate tali forme d'onda; in alto è riportata la forma d'onda del segnale di riferimento P_i a cui poi il segnale di feedback cercherà di agganciarsi. Sotto ad essa sono riportati gli andamenti di P_o e I_c in 9 istanti temporali diversi. A differenza di figura 5.7, dove per la corrente di carica della batteria è stato riportato il valor medio al fine di valutarne l'andamento temporale, in figura 5.8 sono riportati gli andamenti istantanei e quindi l'andamento da valutare riguarda il duty cycle dell'onda quadra.

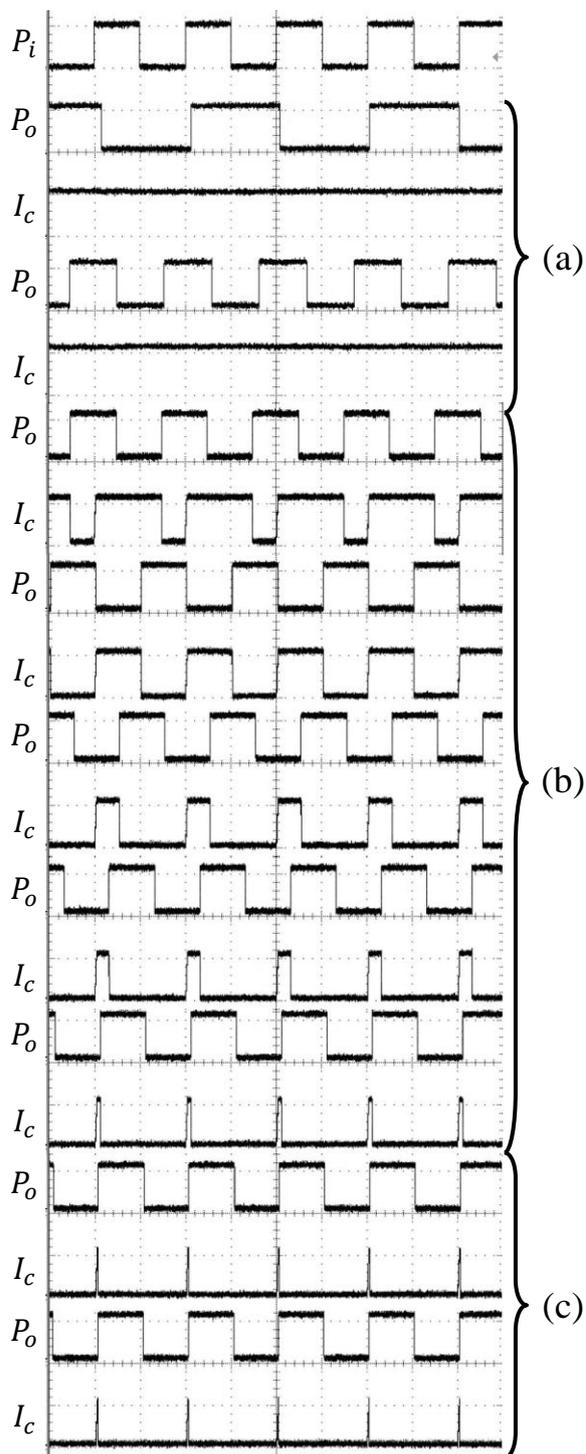


Figura 5.8 – Forme d’onda del segnale di riferimento, del segnale di feedback e della corrente di carica in differenti momenti del processo di carica: (a), (b) e (c) [16]

Nei primi due momenti riportati, indicati in figura 5.7 con la lettera a, la frequenza di feedback P_o è differente rispetto alla frequenza di riferimento P_i pur tendendo ad avvicinarsi progressivamente verso quest’ultima; ci si trova quindi nello stato di aggancio di frequenza del sistema. La corrente di carica appare infatti costantemente al livello massimo costituendo il processo di carica a corrente costante. Nei momenti successivi rappresentati in figura 5.8 al punto (b) l’aggancio di frequenza è ormai avvenuto e la forma d’onda tende ora a traslare al fine di conseguire l’aggancio di fase. Si vede chiaramente come la corrente di carica del sistema sia al valore massimo per un tempo pari alla differenza di fase tra i due segnali ed il suo duty cycle si riduca progressivamente nel tempo. Nella raffigurazione di figura 5.8 al punto (c) invece il duty cycle è talmente ridotto che il sistema si può considerare nella fase di carica flottante.

Per quanto concerne i tempi di carica del sistema non c'è una sostanziale differenza rispetto al sistema di caricabatterie a PLL classico presentato precedentemente. Gli andamenti della corrente di carica e della tensione ai capi della batteria, considerandone per il sistema di carica impulsiva il valor medio, sono analoghi.

	C_C	C_S	η
Caricabatterie a PLL impulsivo	678 mAh	645 mAh	95.1%
Caricabatterie a PLL	644 mAh	603 mAh	93.6%

Tabella 5.1 – La capacità di carica, la capacità di scarica e l'efficienza del processo di carica di una batteria agli ioni di litio da 700mAh

La differenza sostanziale tra questi due sistemi di carica sta nell'efficienza del processo di carica. Confrontando le capacità di carica e di scarica di una batteria agli ioni di litio caricata nella fase a tensione costante con una corrente impulsiva con duty cycle variabile anziché una corrente variabile si può notare come il processo impulsivo ottenga delle performance migliori. Nella tabella 5.1 sono riportati tali valori per una batteria agli ioni di litio da 700 mAh e la differenza è considerevole. E' stata inoltre valutata l'efficienza di carica della batteria definita secondo la relazione:

$$\eta = \frac{C_S}{C_C} \cdot 100\%$$

dove C_S rappresenta la capacità di scarica e C_C quella di carica.

Si quantifica, sempre in tabella 5.1, come l'efficienza di carica migliori utilizzando un processo di carica impulsivo.

Oltre al miglioramento dell'efficienza del processo di carica, uno dei motivi fondamentali per cui il processo di carica impulsivo è spesso utilizzato riguarda il calore generato durante la carica. Come preannunciato il processo di carica impulsivo comporta un gradiente di concentrazione ionica più uniforme da cui

conseguendo una minore generazione di calore durante il processo di accumulo di carica nelle celle della batteria. Mantenere sotto controllo la temperatura nelle batterie è uno degli aspetti fondamentali per il corretto funzionamento delle batterie e soprattutto per allungarne il ciclo di vita.

Dalla figura 5.9 possiamo notare l'andamento della temperatura nel processo di carica utilizzando un sistema di carica impulsivo rispetto ad un normale caricabatterie. Nel confronto il caricabatterie a PLL con carica impulsiva, il quale nella figura 5.9 è rappresentato dalla linea più scura, innalza in maniera molto più lieve la temperatura di esercizio della batteria.

Il minore impatto termico risulta così un ulteriore incentivo all'utilizzo di una struttura di caricabatterie a PLL con corrente di carica impulsiva.

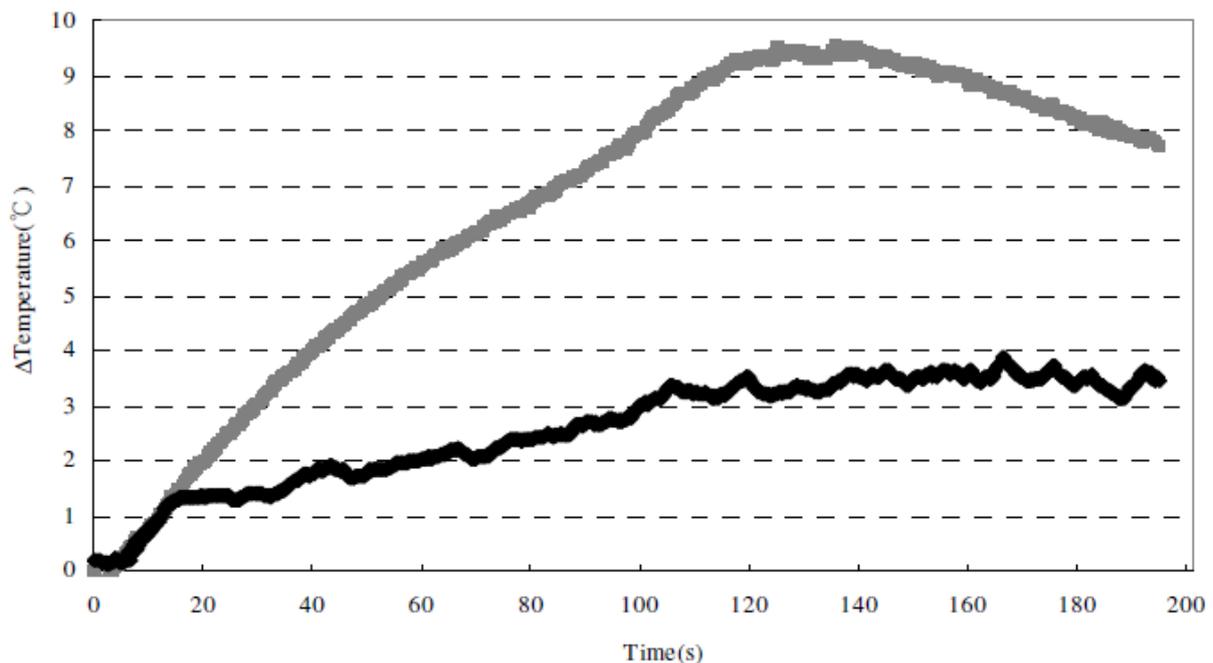


Figura 5.9 – Variazione di temperatura della batteria durante il processo di carica [22]

Conclusioni

In questa tesi, a partire dall'analisi della tecnica di carica delle batterie agli ioni di litio a due fasi rispettivamente a corrente costante ed a tensione costante, è stato teorizzato un modello di caricabatterie con struttura a PLL. Si è quindi giunti alla definizione di un semplice prototipo del modello ed alla validazione della sua funzionalità.

Analizzate quindi le performance di carica del modello proposto, si è giunti all'ottimizzazione del sistema di carica tramite l'introduzione di una tecnica di compensazione della resistenza interna del pacchetto batteria. Tale tecnica ha permesso l'ottimizzazione delle due fasi di carica ed una considerevole diminuzione dei tempi totali di carica.

Infine, illustrati i benefici del processo di carica impulsivo, è stato definito un modello di caricabatterie con struttura a PLL che applichi tale strategia di carica. Sono quindi state analizzate le performance del nuovo sistema il quale, pur non permettendo una riduzione del tempo di carica, migliora la qualità del processo di carica aumentandone l'efficienza e riducendo lo stress termico a cui è sottoposta la batteria.

Bibliografia:

- [1] *www.wikipedia.org*
- [2] *www.batteryuniversity.com*
- [3] Cope, Podrazhansky – *The art of battery charging* – 1999
- [4] Gold – *A PSpice macromodel for Lithium-ion batteries* – 1997
- [5] Linden, Reddy – *Handbook of batteries* – 3rd edition
- [6] Hsieh, Hung – *Phase-locked loop techniques - A survey* – 1996
- [7] Jovcic – *Phase locked loop system for FACTS* – 2003
- [8] Best – *Phase Locked Loops – Design, simulation and applications* – 5th edition
- [9] Banerjee – *PLL performance, simulation and design* – 4th edition
- [10] Wolaver – *Phase-Locked Loop circuit design* – Prentice Hall
- [11] Chen, Lin, Liu, Lai, Jaw – *Phase-locked battery charge system* – 2003
- [12] Chen – *PLL-based battery charge circuit topology* – 2004
- [13] Chen, Han, Jaw, Chou, Liu – *A Resistance compensated phase-locked battery charger* – 2006
- [14] Chen, Liu, Chen – *Improving Phase-Locked battery charger speed by using resistance-compensated technique* – 2009
- [15] Hsieh, Chen, Huang – *Fuzzy-controlled Li-ion battery charge system with active state-of-charge controller* – 2001
- [16] Chen, Chen, Chu, Han – *Current-Pumped Battery Charger* – 2008
- [17] Chen, Liu, Han – *Charge-pump phase-locked-based battery pulse charge system* – 2007

- [18] Chen, Yang, Lai, Hwang, Lee – *A High-Efficiency multimode Li-Ion battery charger with variable current source and controlling previous-stage supply voltage* – 2009
- [19] Chen – *A design of optimal pulse charge system by variable frequency technique* – 2007
- [20] Emura, Wang, Yamanaka, Nakamura – *A high-precision positioning servo controller based on phase/frequency detecting technique of two-phase-type PLL* – 2000
- [21] Hwang, Wang, yang, Chen – *New compact CMOS Li-Ion battery charger using charge-pump technique for portable applications* – 2007
- [22] Chen, Young, Chu, liu – *Phase-Locked bidirectional converter with pulse charge function for 42V/14V dual-voltage powernet* – 2010
- [23] Chen, Chou, Han, Chang, Lin – *A design of a digital frequency-locked battery charger for Li-ion batteries* – 2005
- [24] Texas Instruments – *CD4046B types CMOS Micropower Phase-Locked Loop* – 2003
- [25] National Semiconductor – *CD4046BM/CD4046BC Micropower Phase-Locked Loop* – 1995
- [26] Texas Instruments – *CD4046B Phase-Locked Loop: a versatile building block for micropower digital and analog applications* – 2003

