



Ricerca di Sistema elettrico

# Studio e progetto preliminare per un sistema di ricarica dinamica wireless

Manuele Bertoluzzo



## STUDIO E PROGETTO PRELIMINARE PER UN SISTEMA DI RICARICA DINAMICA WIRELESS

Manuele Bertoluzzo, (Laboratorio di Sistemi Elettrici per l'Automazione e la Veicolistica, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova)

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: "Mobilità elettrica sostenibile"

Obiettivo: Tecnologie e infrastrutture di ricarica (in particolare veloce) di veicoli elettrici

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Studio e progetto preliminare per un sistema di ricarica dinamica wireless"

Responsabile scientifico ENEA: Dott.ssa Rosanna Pinto

Responsabile scientifico: Prof. Manuele Bertoluzzo

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 IMPLEMENTAZIONE E SPERIMENTAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROLLO DELLA CARICA DEGLI ACCUMULATORI.....	5
2.1.1 <i>Risultati sperimentali</i> .....	6
2.2 PROGETTO E IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA AUTOMATICO PER IL MANTENIMENTO DELLA CONDIZIONE DI RISONANZA.....	8
2.2.1 <i>Riconoscimento della condizione di risonanza</i> .....	8
2.2.2 <i>Sistema di controllo della fase</i> .....	8
2.2.3 <i>Risultati sperimentali</i> .....	9
2.3 PROGETTAZIONE E IMPLEMENTAZIONE DEL SISTEMA DI COMUNICAZIONE IN RADIOFREQUENZA .....	10
2.3.1 <i>Livelli fisico e data link</i> .....	10
2.3.2 <i>Livello applicazione</i> .....	11
2.3.3 <i>Risultati sperimentali</i> .....	11
2.4 PROGETTAZIONE E IMPLEMENTAZIONE DEL SISTEMA DI COMUNICAZIONE PER LA PARAMETRIZZAZIONE/MONITORAGGIO DEL CARICABATTERIA WIRELESS .....	13
2.4.1 <i>Livelli fisico e data link</i> .....	13
2.4.2 <i>Livello applicazione</i> .....	14
2.4.3 <i>Risultati sperimentali</i> .....	15
2.5 ASSISTENZA ALLA REALIZZAZIONE DEL CARICABATTERIA WIRELESS DINAMICO PROTOTIPALE.....	15
3 CONCLUSIONI.....	16
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	17
5 APPENDICE.....	17

## Sommario

Nel corso del Piano Annuale di Realizzazione 2017 sono state affrontate alcune questioni specifiche relative al controllo e al monitoraggio di un prototipo di caricabatteria wireless dinamico (CWD) che non erano ancora state considerate negli anni precedenti o per le quali le soluzioni proposte non erano ancora state sperimentate completamente. Dopo la fase di analisi e progettazione, i nuovi algoritmi e i componenti hardware e firmware necessari alla loro implementazione sono stati testati sul prototipo di caricabatteria wireless statico (PCWS) disponibile presso il Laboratorio di sistemi Elettrici per l'Automazione e la Veicolistica del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova.

Riguardo il controllo del CWD, è stato verificato sperimentalmente il funzionamento degli algoritmi di controllo della sezione ricevente del caricabatteria ed è stata perfezionata la loro interazione con gli algoritmi di controllo della sezione trasmittente. Inoltre è stato sviluppato un algoritmo che è in grado di accordare automaticamente la frequenza della tensione generata dall'invertitore che alimenta la bobina trasmittente alla frequenza di risonanza del carico equivalente visto ai suoi morsetti. Operare in risonanza porta l'invertitore a fornire al carico solamente la potenza attiva che, a parte le perdite, viene trasferita agli accumulatori. Questa condizione consente di ridurre la potenza di dimensionamento dell'invertitore e aumenta l'efficienza del trasferimento di potenza dato che la componente reattiva della corrente erogata è nulla. Infine, è stato progettato e implementato sia dal punto di vista hardware che software il sistema di comunicazione a radiofrequenza tra le due sezioni del CWD. Mentre l'hardware è basato su ricetrasmittitori commerciali, le routine software per la gestione della comunicazione sono state studiate e realizzate appositamente per l'applicazione considerata e sono state inserite nel firmware preesistente senza alterarne le prestazioni; anche in questo caso è stato impiegato il PCWS per effettuare le prove sperimentali. Riguardo il monitoraggio del funzionamento del CWD, è stata sviluppata una libreria di funzioni che inizializza e gestisce un canale di comunicazione seriale tra la scheda di controllo della sezione trasmittente del CWD e un PC mediante il quale è possibile accedere ai parametri di funzionamento del caricabatteria e monitorare l'evoluzione delle variabili interne dell'algoritmo di controllo.

Parallelamente a queste attività di ricerca e sperimentazione, è anche stata fornita assistenza ai progettisti e ai tecnici della ditta incaricata della realizzazione del CWD prototipale.

## 1 Introduzione

Grazie alla elevata efficienza del powertrain e alla assenza di emissioni localizzate, i veicoli elettrici rappresentano una soluzione praticabile ai problemi del prossimo esaurimento di combustibili fossili e dell'inquinamento atmosferico. Esistono tuttavia due principali problemi che rallentano la loro diffusione generalizzata, costituiti dall'autonomia, che tipicamente è ancora inferiore a quella di un veicolo tradizionale, e al tempo richiesto per la ricarica degli accumulatori di bordo, che solitamente non è inferiore a mezz'ora. La ricarica wireless dinamica offre la possibilità di trasferire energia a bordo di un veicolo elettrico in movimento, risolvendo così entrambi i problemi menzionati sopra e, anzi, consentendo di realizzare veicoli elettrici dotati di accumulatori di taglia inferiore, e quindi più leggeri, meno ingombranti e meno costosi. Il principio fisico alla base del funzionamento dei sistemi per la ricarica wireless dinamica è l'accoppiamento induttivo tra due bobine. La bobina trasmittente è interrata sotto il manto stradale ed alimentata con una corrente ad alta frequenza (AF) che genera un campo di induzione magnetica nello spazio circostante la bobina stessa. Quando la bobina ricevente, installata sotto il pianale del veicolo, è concatenata dalle linee di flusso dell'induzione magnetica, risulta sede di una tensione indotta che, opportunamente condizionata, è usata per effettuare la ricarica degli accumulatori di bordo. Al fine di consentire un trasferimento di energia continuo al veicolo in movimento è necessario installare una serie di bobine trasmettenti lungo il suo percorso che risultano accoppiate una dopo l'altra alla bobina ricevente che si muove sopra di loro. Oltre alle bobine, un secondo elemento fondamentale dei sistemi di ricarica wireless è costituito dai convertitori statici di energia elettrica che hanno il compito di energizzare e de-energizzare le bobine trasmettenti via via che il veicolo procede e di condizionare la tensione indotta ai capi della bobina ricevente. Al fine di instaurare e mantenere un funzionamento sinergico tra i convertitori statici installati a bordo del veicolo e quelli che alimentano le bobine trasmettenti è necessario che venga mantenuto un flusso costante di informazioni tra di loro, ad esempio per informare il sistema di gestione degli invertitori di alimentazione dell'approssimarsi del veicolo o fornire le grandezze di riferimento e/o retroazione necessarie ad effettuare la ricarica in sicurezza [1].

Sia le bobine che i convertitori statici sono stati oggetto di ricerca nel corso del Piano Annuale di Realizzazione 2016. In quella sede sono stati sviluppati i progetti esecutivi per le bobine ed è stato effettuato il dimensionamento dei principali componenti dei convertitori statici; inoltre sono stati progettati e simulati gli algoritmi di controllo del sistema wireless. L'attività svolta nel corso di quest'anno è stata focalizzata sulla verifica sperimentale degli algoritmi precedentemente sviluppati, sulla progettazione, implementazione e sperimentazione dell'algoritmo per il mantenimento della condizione di risonanza delle reti di compensazione e sulla progettazione e sull'implementazione dei sistemi di comunicazione e monitoraggio del caricabatteria wireless. Oltre alle attività sopra menzionate, è stata fornita assistenza tecnica alla ditta incaricata della realizzazione del CWD prototipale.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Implementazione e sperimentazione del sistema di controllo della carica degli accumulatori

Come descritto nella rapporto redatto al termine del precedente anno, lo schema di principio del CWD può essere rappresentato come in figura 1. La bobina ricevente del CWD è connessa ad un raddrizzatore a diodi che alimenta un convertitore cc/cc il quale a sua volta fornisce potenza al bus in continua del veicolo; questa potenza viene suddivisa tra gli accumulatori e l'azionamento di trazione. Lo schema a blocchi del sistema di controllo del convertitore cc/cc è riportato in figura 2. Esso è basato su due anelli di controllo innestati dei quali quello interno controlla la corrente di carica della batteria  $I_b$  mentre quello esterno regola la tensione della batteria stessa, evitando di sovraccaricarla. Nello schema,  $I_{cc,out}$  rappresenta la corrente all'uscita del convertitore cc/cc, data dalla somma della corrente  $I_b$  e della corrente  $I_{tr}$  assorbita dall'azionamento di trazione.

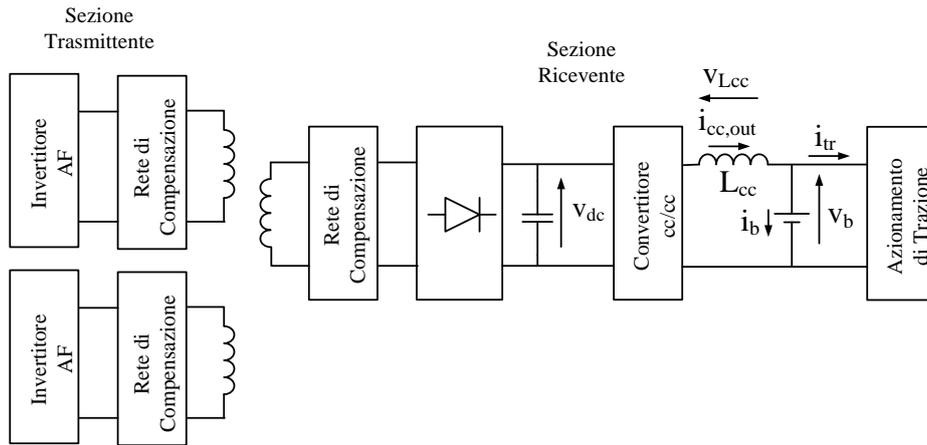


Figura 1. Schema di principio del sistema di ricarica dinamica wireless.

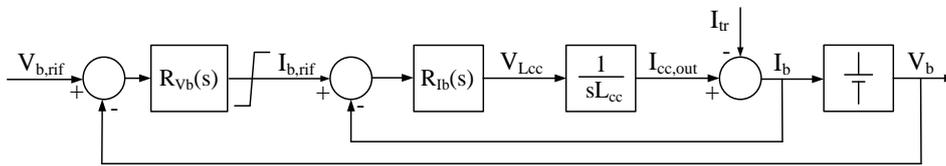


Figura 2. Schema a blocchi dell’algoritmo di controllo della carica della batteria.

Data la lentezza del processo di carica degli accumulatori, i requisiti per la dinamica dei due anelli di controllo sono relativamente blandi. Tuttavia si è preferito progettare l’anello di controllo della corrente con una banda passante comunque elevata, intorno a 1 kHz, affinché esso sia in grado di mantenere il controllo della corrente anche in condizioni estreme, quali l’improvviso distacco degli accumulatori o un parziale cortocircuito ai loro terminali. I due anelli di controllo sono stati implementati e sperimentati sul PCWS, considerando il fatto che, per quanto riguarda il convertitore cc/cc e la carica degli accumulatori, il suo funzionamento è assimilabile a quello del CWD. I risultati delle prove effettuate sono riportati di seguito.

### 2.1.1 Risultati sperimentali

Secondo la prassi comune, inizialmente è stato testato l’anello di controllo della corrente, iniettando in un accumulatore di prova una corrente variabile ad onda quadra tra due valori predefiniti. Il riferimento di corrente è stato generato adattando opportunamente il firmware del microprocessore ( $\mu P$ ) installato sulla sezione ricevente del PCWS. Nella figura 3 è riportato l’andamento della corrente  $I_b$  ottenuta imponendo come riferimento un gradino variabile tra 2.5 A e 5 A. Dal grafico si nota come la corrente raggiunga il valore prefissato in circa 1ms seguendo un andamento a rampa. Tale comportamento è dovuto alla temporanea saturazione del regolatore di corrente  $R_{ib}(s)$  causata dalla azione concomitante della induttanza di filtro  $L_{cc}$

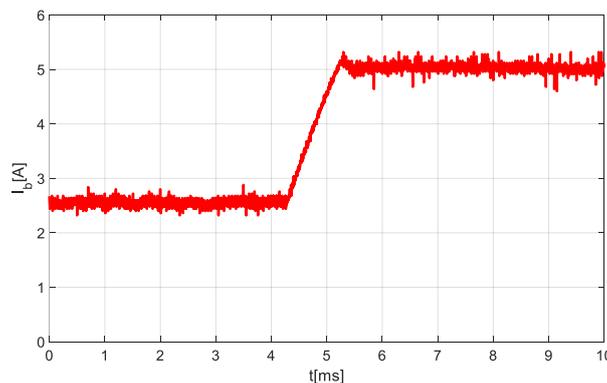
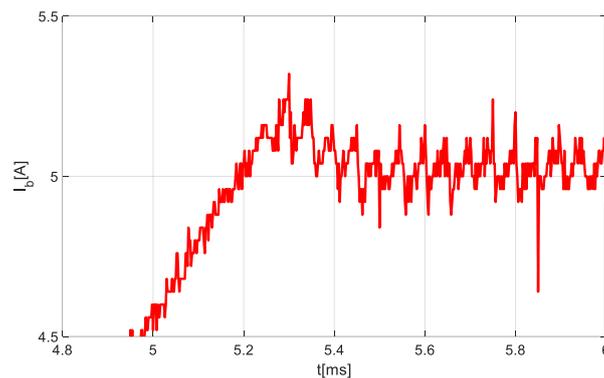


Figura 3. Risposta della corrente  $I_b$  ad un gradino di riferimento.

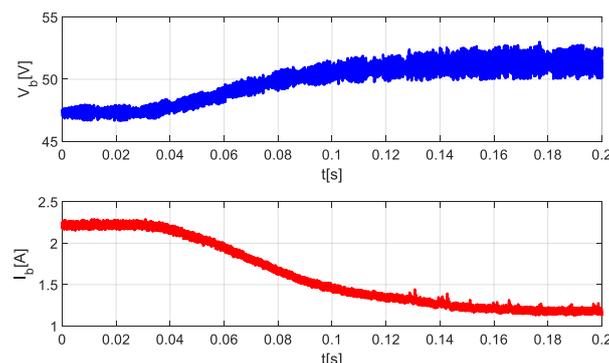


**Figura 4. Dettaglio della risposta di  $I_b$  ad un gradino di riferimento.**

posta all'uscita del convertitore cc/cc, e deputata a ridurre il ripple di corrente nella batteria, e del valore finito della tensione disponibile all'ingresso del convertitore stesso. La figura 4 mostra un ingrandimento della figura 3 relativo all'ultimo tratto della rampa di salita della corrente. Qui  $R_{I_b}(s)$  riprende il funzionamento lineare e forza la corrente a seguire il valore di riferimento con una sovraelongazione solo di poco superiore al ripple della corrente, dimostrando così l'efficacia dell'algoritmo di anti wind-up di cui esso è dotato.

Dopo aver verificato il corretto funzionamento dell'anello di corrente, è stato testato anche quello di tensione. L'insieme del regolatore  $R_{V_b}(s)$  e del blocco limitatore posto alla sua uscita sono stati dimensionati per operare in saturazione durante la fase di carica a corrente costante dell'accumulatore e per passare al funzionamento lineare quando la tensione dell'accumulatore si avvicina al valore di fine carica. Al fine di velocizzare l'esecuzione delle prove sperimentali, l'aumento della tensione  $V_b$  conseguente all'incremento dello stato di carica dell'accumulatore è stato simulato collegando in serie all'accumulatore di prova un resistore variabile e aumentandone la resistenza dopo che la corrente  $I_b$  aveva raggiunto il riferimento relativo alla fase di carica a corrente costante. A causa dei limiti imposti dall'apparato sperimentale, questa prova è stata effettuata per correnti dimezzate rispetto a quelle riportate nei test precedenti e per una tensione dell'accumulatore un po' inferiore a quella nominale. Nella parte superiore della figura 5 è riportato l'andamento della tensione  $V_b$  misurata ai capi della serie formata dall'accumulatore e dal resistore variabile. Dopo un intervallo di tempo di circa 0.03 s durante il quale la tensione si mantiene costante a circa 47 V e la resistenza posta in serie all'accumulatore è di 0  $\Omega$ , il valore di quest'ultima è stato aumentato fino a circa 4.2  $\Omega$  causando un incremento della tensione  $V_b$ . Il sistema di controllo della carica dell'accumulatore reagisce alla variazione di tensione diminuendo la corrente di carica  $I_b$  al fine di evitare che la tensione superi il valore limite, che in questo caso è stato fissato a 52 V. Il corrispondente andamento della corrente è riportato nella metà inferiore della figura 5.

E' da considerare che l'esperimento sopra riportato è solo una approssimazione delle condizioni reali di funzionamento del sistema dato che nel test effettuato  $V_b$  e  $I_b$  sono strettamente correlate per la presenza della resistenza serie mentre nel caso reale una diminuzione della corrente di carica non avrebbe un effetto altrettanto marcato sulla tensione dato che la resistenza interna dell'accumulatore installato sul veicolo è sicuramente molto minore di quella usata nella prova. In ogni caso i risultati ottenuti mostrano che



**Figura 5. Andamento della tensione  $V_b$  (sopra) e corrente  $I_b$  (sotto) durante la carica simulata di un accumulatore.**

l'algoritmo implementato è effettivamente in grado di evitare il sovraccarico dell'accumulatore e che il suo tempo di risposta è sicuramente adeguato alle dinamiche del processo di carica.

Come nelle figure precedenti, si nota che la corrente  $I_b$  è affetta da un ripple dovuto alle commutazioni del convertitore cc/cc. Tali oscillazioni della corrente si ripercuotono anche sul profilo della tensione  $V_b$  per la presenza della resistenza serie; proprio a causa dell'incremento di quest'ultima, il ripple appare più evidente per valori più elevati della tensione.

## 2.2 Progetto e implementazione di un sistema automatico per il mantenimento della condizione di risonanza

I sistemi per la ricarica wireless impiegano reti di compensazione per massimizzare l'efficienza di trasmissione e per ridurre la potenza di dimensionamento dell'invertitore di alimentazione e delle bobine. Esistono varie tipologie di reti di compensazione; ad esempio, il PCWS adotta la topologia serie-serie, mentre nel progetto relativo al CWD è stata selezionata la topologia LCL, nella quale la bobina di accoppiamento, un condensatore e una bobina ausiliaria sono collegati in una rete a T. Indipendentemente dalla topologia, il corretto funzionamento del caricabatteria wireless statico è basato su una qualche forma di risonanza tra i componenti reattivi che costituiscono la rete di compensazione e le induttanze delle bobine di accoppiamento che si instaura quando essi sono sollecitati alla frequenza di alimentazione nominale. Le inevitabili tolleranze costruttive e l'invecchiamento dei componenti richiedono che all'accensione del caricabatteria wireless la frequenza di alimentazione sia accordata automaticamente al fine di mantenere la condizione di risonanza. Nei caricabatteria wireless dinamici l'aggiustamento della frequenza deve essere effettuato in maniera continuativa e in tempi ridotti dal momento che l'autoinduttanza delle bobine di accoppiamento è soggetta a variazioni causate dal moto reciproco dei nuclei ferromagnetici delle bobine durante la corsa del veicolo.

Sulla base di queste considerazioni è stato sviluppato un algoritmo che effettua l'aggiustamento automatico della frequenza di alimentazione per portare e mantenere la rete di compensazione in risonanza. Esso è stato sviluppato e sperimentato sul PCWS, ma può essere impiegato anche se le reti di compensazione sono di tipo LCL.

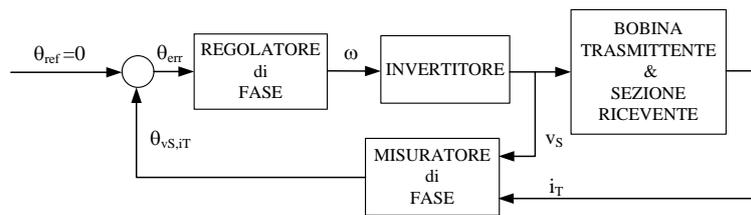
### 2.2.1 Riconoscimento della condizione di risonanza

Le perdite nei caricabatteria wireless sono dovute principalmente alle resistenze parassite degli avvolgimenti delle bobine e degli interruttori elettronici e dei diodi che costituiscono i convertitori statici di potenza. Esse dipendono dal quadrato delle ampiezza delle correnti coinvolte nel funzionamento del caricabatteria wireless e pertanto possono essere efficacemente ridotte riducendo l'ampiezza di tali correnti. Data una certa potenza da trasferire agli accumulatori, la corrente erogata dall'invertitore di alimentazione assume la minima ampiezza quando essa risulta in fase con la tensione. Per questo motivo uno dei criteri utilizzati nel dimensionamento delle reti di compensazione è l'azzeramento della componente reattiva della impedenza equivalente vista ai morsetti dell'invertitore di alimentazione. Da questa considerazione deriva che l'elemento principale del sistema automatico per il mantenimento della risonanza è il circuito per la misurazione della fase esistente tra la tensione e corrente all'uscita dell'invertitore. Esso è stato installato sul PCWS ed è basato sulla applicazione della funzione logica XOR a due segnali digitali ottenuti squadrandolo la forme d'onda della tensione e della corrente in uscita dell'invertitore. Il valore medio del segnale ottenuto, reso disponibile mediante un filtro passa basso, risulta proporzionale allo sfasamento tra le due grandezze di interesse.

### 2.2.2 Sistema di controllo della fase

Il segnale generato dal misuratore di fase viene acquisito da un convertitore analogico digitale e costituisce il segnale di retroazione del sistema di controllo di fase rappresentato nello schema a blocchi di figura 6.

Il regolatore di fase processa l'errore di fase e determina la frequenza angolare della tensione di alimentazione che viene generata dall'invertitore. Dal momento che tale frequenza non può essere nulla in assenza di errore di fase, il regolatore di fase deve necessariamente svolgere un'azione integratrice; inoltre il segno del suo guadagno non può essere fissato a priori in quanto, a causa del fenomeno della biforcazione,



**Figura 6. Schema a blocchi del sistema di controllo di fase.**

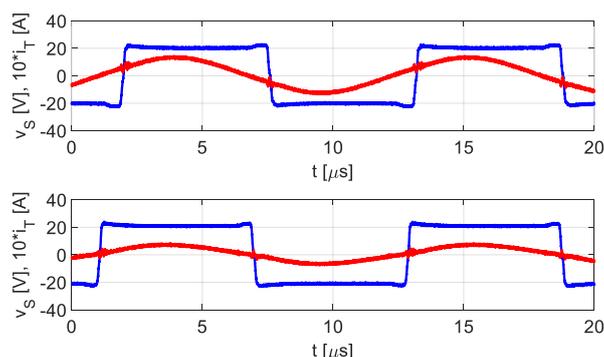
può accadere che in determinate condizioni di carico sia necessario aumentare la frequenza di alimentazione per annullare un errore di fase positivo mentre in altre condizione può essere necessario ridurla. Una spiegazione dettagliata di tale fenomeno è riportata in [2]. Al fine di superare questa difficoltà, è stato progettato un regolatore integrale a tempo discreto che controlla all'inizio di ciascun periodo di campionamento se il valore assoluto dell'errore di fase è inferiore o superiore all'errore assoluto campionato nel periodo precedente. Nel primo caso, il segno del guadagno rimane invariato mentre nel secondo caso esso viene modificato prima di aggiornare la frequenza di alimentazione.

### 2.2.3 Risultati sperimentali

I test di funzionamento sono stati eseguiti iniziando la frequenza di alimentazione ad un valore diverso da quello di risonanza e verificando che essa venisse automaticamente portata al valore corretto, ossia al valore che rende nulla la fase  $\theta_{v_S,i_T}$  tra la tensione e la corrente all'uscita dell'invertitore, quest'ultima corrispondente con la corrente che circola nella bobina trasmittente. I test sono stati eseguiti per valori diversi del carico per verificare la capacità del regolatore di fase di adeguare automaticamente il segno del guadagno alle condizioni di lavoro. In tutti i casi il raggiungimento della condizione di risonanza è stato verificato mediante misura della fase  $\theta_{v_S,i_T}$ .

A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti da una prova effettuata in condizioni di carico nominale. Nella metà superiore della figura 7 sono riportate le forme d'onda della tensione di alimentazione e della corrente nella bobina trasmittente prima dell'attivazione del regolatore di fase. La figura è stata ottenuta impostando la frequenza di alimentazione a 89 kHz mentre la frequenza di risonanza nominale del carico equivalente visto dall'invertitore è di 85 kHz. Dopo l'attivazione del regolatore di fase si sono ottenute le forme d'onda riportate nella parte inferiore delle figura 3.2. Si noti come la corrente risultai ora in fase con la tensione e abbia una ampiezza minore. La frequenza di alimentazione risulta di 84.74 kHz, quindi molto vicina a quella nominale.

Nell figura 8 sono riportati gli andamenti della corrente nella bobina trasmittente e della fase della tensione di alimentazione rispetto a quella della corrente nella bobina trasmittente, corrispondente quindi all'errore di fase, durante il transitorio immediatamente successivo alla attivazione del regolatore di fase. Dato il tempo di acquisizione relativamente lungo non è possibile apprezzare i dettagli della forma d'onda della corrente, ma si può comunque dedurre che la sua ampiezza raggiunge il valore di regime in circa 10ms. Tale dato è confermato anche dall'andamento dell'errore di fase, che si azzerava in circa 10 ms.



**Figura 7. Tensione e corrente all'uscita dell'invertitore di alimentazione prima (sopra) e dopo (sotto) l'attivazione del regolatore di fase.**

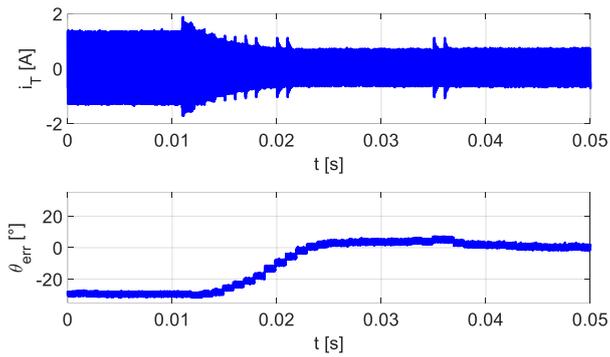


Figura 8. Corrente all’uscita dell’invertitore di alimentazione (sopra) ed errore di fase (sotto) durante il transitorio.

2.3 Progettazione e implementazione del sistema di comunicazione in radiofrequenza

Nell’ambito delle attività del progetto dello scorso anno lo schema a blocchi dell’algoritmo di controllo era stato definito secondo diagramma di figura 9. Nello schema il simbolo  $V_{ch}$  rappresenta la tensione continua all’ingresso del convertitore cc/cc presente nella sezione ricevente del CWD e il sistema di controllo è stato trattato nel capitolo 2. Tale tensione deve essere mantenuta superiore a quella degli accumulatori e sufficientemente costante da assicurare un funzionamento regolare del convertitore. La tensione  $V_{ch}$  è proporzionale all’ampiezza della tensione indotta nella bobina ricevente, che a sua volta è proporzionale alla ampiezza  $I_{t,a}$  della corrente nella bobina trasmittente. Per questa ragione il controllo della tensione  $V_{ch}$  viene eseguito agendo su  $I_{t,a}$  tramite l’ampiezza della tensione di alimentazione  $V_{s,a}$  generata dall’invertitore installato nella sezione trasmittente. I regolatori  $R_{V_{ch}}(s)$  e  $R_{i_t}(s)$  che controllano rispettivamente  $V_{ch}$  e  $I_{t,a}$ , sono implementati nel firmware della scheda di controllo della sezione trasmittente, ma la grandezza di retroazione  $V_{ch}$  è accessibile solamente dalla circuiteria della sezione ricevente.

E’ quindi necessario realizzare un sistema di comunicazione tra le due sezioni per il trasferimento di questo dato, indispensabile per il corretto funzionamento del CWD. Poiché lo scambio di dati avviene mediante una connessione punto-punto, non è necessario realizzare tutti i livelli del modello di comunicazione ISO/OSI nella implementazione del protocollo, ma solamente i livelli fisico, data link e applicazione. Il livello fisico non può ovviamente essere basato su una connessione cablata per cui è stato deciso di realizzarlo mediante una coppia di ricetrasmittitori (R/T) a radiofrequenza interfacciati con i  $\mu P$  delle schede di controllo del CWD. Nell’ambito di questo tipo di applicazioni il  $\mu P$  che controlla il R/T viene comunemente definito “host”.

2.3.1 Livelli fisico e data link

Una analisi del mercato ha rivelato che sono disponibili numerosi modelli di R/T a radiofrequenza adatti all’applicazione considerata. Essi operano sulla banda dei 2.4 GHz, riservata alla applicazioni non commerciali per uso industriale, scientifico e medico e irradiano potenze limitate, pertanto il loro impiego non è soggetto al rilascio di particolari permessi. Alcuni modelli adottano il protocollo WiFi mentre altri basano il loro funzionamento su protocolli proprietari; per entrambe le topologie sono disponibili modelli che usano porte di tipo UART oppure SPI per interfacciarsi con il  $\mu P$  host. Nel caso considerato è stato impiegato il dispositivo nRF24L01+ prodotto dalla ditta Nordic [3]. Esso si interfaccia al  $\mu P$  host mediante una porta di comunicazione SPI [4], selezionata per l’elevato bit rate, fino a 10 Mb/s nel caso del  $\mu P$  considerato, e la semplicità di gestione, e opera al livello data link con un protocollo proprietario denominato “ShockBurst” che gestisce automaticamente lo scambio di dati nelle due direzioni, senza richiedere l’intervento del  $\mu P$  host, e impiega messaggi con un overhead ridotto rispetto alla quantità di dati trasmessi.

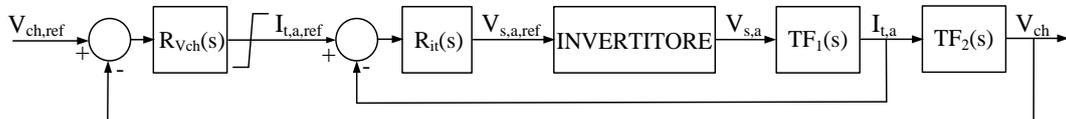


Figura 9. Schema a blocchi dell’algoritmo di controllo della sezione trasmittente.

La parametrizzazione della comunicazione è abbastanza semplice e richiede innanzitutto di stabilire quale dei due R/T sia il “trasmettitore primario” e quale il “ricevitore primario”, di assegnare loro degli identificatori e di definire quale canale utilizzare tra i 64 disponibili. Lo scambio di dati viene sempre iniziato dal trasmettitore primario, installato sulla sezione trasmittente del caricabatteria wireless, che invia un messaggio e poi commuta nella modalità ricevente in attesa di un messaggio di acknowledge (ACK) da parte del ricevitore primario. Il messaggio ACK, oltre a confermare l’avvenuta ricezione, contiene anche un campo dati che può essere utilizzato per inviare informazioni nella direzione opposta. Il ricevitore primario, installato sulla sezione ricevente, dopo aver ricevuto il messaggio, commuta nella modalità trasmittente e invia il messaggio ACK per poi tornare nella modalità ricezione in attesa di un nuovo messaggio. Il trasmettitore primario, dopo aver ricevuto l’ACK, ritorna nella modalità trasmittente, in attesa che il  $\mu P$  host richieda l’invio di un nuovo messaggio. Il trasmettitore primario genera un segnale di interrupt che segnala al  $\mu P$  la corretta ricezione dell’ACK, oppure la sua mancata ricezione entro un tempo di attesa predefinito; il ricevitore primario invece genera il segnale di interrupt ogni volta che riceve correttamente un messaggio. Ogni commutazione tra le modalità di trasmissione e ricezione richiede circa  $130\mu s$ , e quindi non è possibile effettuare una trasmissione continua di dati tra le due sezioni del CWD.

### 2.3.2 Livello applicazione

Il livello applicazione è molto semplice in quando il contenuto dei messaggi viene fissato in anticipo e non richiede di essere specificato di volta in volta. In particolare, ad ogni trasmissione il trasmettitore primario invia un byte che informa la sezione ricevente riguardo il proprio stato operativo affinché essa possa gestire di conseguenza le operazioni di trasferimento di potenza. La sezione ricevente insieme all’ACK invia un byte di dati con il proprio stato, due byte che contengono l’informazione relativa alla tensione del bus in continua e altri due byte che riportano il valore di picco della corrente nella bobina ricevente. Ognuna delle due grandezze elettriche è rappresentata mediante i 12 bit ottenuti dal convertitore analogico digitale deputato alla sua acquisizione e conversione in formato numerico. Il calcolo dei valori effettivi della tensione e della corrente è effettuato dal firmware della sezione trasmittente. Oltre alle informazioni sopra descritte, le due sezioni inseriscono nei messaggi da loro generati ulteriori quattro byte di dati che possono essere utilizzati per ulteriori sviluppi del protocollo.

### 2.3.3 Risultati sperimentali

Anche in questo caso è stato impiegato il PCWS per verificare la bontà delle soluzioni tecniche che saranno impiegate sul CWD. L’implementazione del sistema di comunicazione richiede che all’accensione i  $\mu P$  delle schede di controllo inviino ai R/T opportuni comandi di parametrizzazione tramite la porta SPI. Nel corso del funzionamento normale, la stessa porta viene impiegata per fornire ai R/T i dati da trasmettere e per ottenere da essi i dati ricevuti. Oltre alla porta SPI, i  $\mu P$  utilizzano un pin per fornire ai R/T il segnale digitale di abilitazione, e un secondo pin per ricevere da essi il segnale di interrupt.

Le seguenti figure riportano l’andamento di alcuni segnali digitali presenti sui pin del  $\mu P$  host durante l’esecuzione del programma di controllo e la contestuale gestione del sistema di comunicazione wireless. I due segnali in alto sono generati solamente per scopi di test e monitoraggio mentre i due segnali in basso sono legati al funzionamento del sistema di comunicazione. Le figure si riferiscono al trasmettitore primario perché esso presenta una gestione leggermente più complessa del ricevitore primario

Nella figura 10 la prima traccia dall’alto, di colore magenta, rappresenta gli intervalli di tempo in cui il  $\mu P$  risulta impegnato a svolgere una qualche funzione legata al controllo del CWD. Durante gli intervalli di tempo indicati con A il  $\mu P$  esegue le routine relative alla comunicazione in radiofrequenza mentre nell’intervallo di tempo indicato con B esso è impegnato a gestire l’interfaccia utente descritta in [5] ed, eventualmente, la comunicazione seriale impiegando il protocollo che sarà descritto nel capitolo 2.4. A prima vista può risultare sorprendente che il tempo richiesto per la gestione del protocollo in radiofrequenza risulti maggiore di quello destinato alla gestione dell’interfaccia utente, che concettualmente richiede operazioni più articolate. Ciò è dovuto al fatto che, come verrà illustrato in seguito, gran parte della durata degli intervalli di tipo A è impegnata per lo scambio dati tra il  $\mu P$  e il R/T. Dal momento che la frequenza di aggiornamento dei dati sul canale a radiofrequenza è stata impostata a 2kHz, gli intervalli indicati con A distano tra loro di circa  $500\mu s$ ,

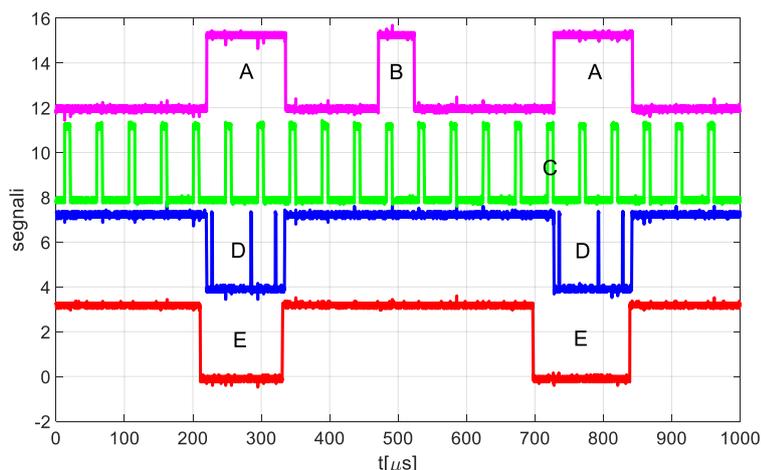


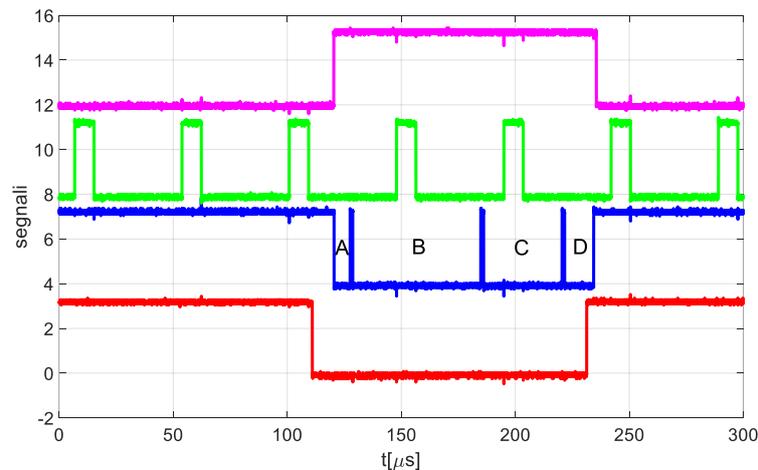
Figura 10. Segnali rappresentativi delle attività svolte dal  $\mu P$ .

mentre la gestione dell'interfaccia utente viene effettuata una volta ogni ms, per cui nella figura compare un solo intervallo di tempo marcato con B. In entrambi i casi viene utilizzato un timer interno al  $\mu P$  per triggerare l'inizio della esecuzione delle routine.

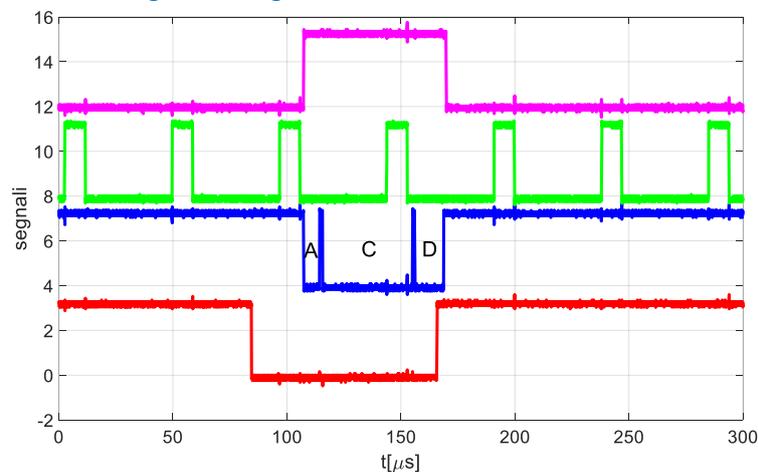
Al di fuori degli intervalli A e B il  $\mu P$  è impegnato in un ciclo di attesa oppure esegue le routine di controllo del caricabatteria wireless. Gli intervalli di tempo dedicati a quest'ultimo compito sono indicati dalla seconda traccia dall'alto, di colore verde, e uno di essi è indicato con la lettera C. L'esecuzione delle routine di controllo avviene in risposta ad un interrupt che si ripete con un periodo pari a  $47 \mu s$ , cioè una volta ogni quattro periodi della tensione generata dell'invertitore, ed ha una priorità maggiore della gestione dell'interfaccia utente e della comunicazione in RF per cui, esaminando la figura, si può dedurre che mediamente la gestione della comunicazione mediamente viene interrotta due volte per l'esecuzione delle routine di controllo mentre la gestione dell'interfaccia viene interrotta una sola volta.

La terza traccia dall'alto, di colore blu, rappresenta gli intervalli di tempo in cui il  $\mu P$  è impegnato a scambiare dati con il R/T. In ognuno degli intervalli indicati con D vengano scambiati quattro pacchetti di dati di dimensioni diverse; essi saranno descritti in dettaglio nelle figure seguenti. La quarta traccia, di colore rosso riporta lo stato del pin del R/T che indica la presenza di un interrupt. La transizione dal livello logico alto al livello basso avviene alla ricezione di un messaggio oppure allo scadere dell'intervallo di tempo entro il quale la ricezione sarebbe dovuta avvenire. Lo stato del pin viene resettato dal  $\mu P$  inviando un apposito comando al R/T tramite la porta SPI.

La figura 11 permette di apprezzare con maggior dettaglio la sequenza dei dati trasmessi sulla porta SPI. Allo scadere dell'intervallo di  $500 \mu s$  inizia la gestione della comunicazione in RF e il  $\mu P$  verifica lo stato del pin relativo all'interrupt generato dal R/T. Se esso risulta basso, durante l'intervallo indicato con A il  $\mu P$  richiede al R/T quale tipo di interrupt si sia verificato. Nel caso l'interrupt si riferisca alla corretta ricezione di un messaggio, durante l'intervallo indicato con B il  $\mu P$  riceve dal R/T i dati contenuti in tale messaggio e successivamente, durante l'intervallo C, gli invia i dati da includere nel prossimo messaggio che sarà trasmesso. Infine, nell'intervallo D, il  $\mu P$  invia al R/T il comando che resetta il pin di interrupt. Si può notare come l'intervallo B abbia durata maggiore dell'intervallo C: ciò è dovuto al fatto che, come spiegato nel paragrafo 2.3.2, il campo dati trasmesso dal ricevitore primario contiene 4 byte in più rispetto a quello del trasmettitore primario. Nel caso invece l'interrupt sia relativo alla mancata ricezione di un messaggio, le operazioni si svolgono come mostrato nella figura 12. In questo caso l'intervallo B non è presente in quanto il  $\mu P$  non legge i dati provenienti dal R/T ma comunque aggiorna le informazioni da trasmettere nel corso dell'intervallo C. Come nel caso precedente la sequenza di operazioni si conclude con l'intervallo D, durante il quale viene spedito il comando di reset dell'interrupt.



**Figura 11. Segnali in caso di ricezione corretta.**



**Figura 12. Segnali in caso di mancata ricezione.**

## 2.4 Progettazione e implementazione del sistema di comunicazione per la parametrizzazione/monitoraggio del caricabatteria wireless

Il sistema di comunicazione per la parametrizzazione e il monitoraggio del CWD ha lo scopo di permettere uno scambio di dati bidirezionale tra il caricabatteria e un PC. Per questioni di semplicità realizzativa si prevede che il PC sia connesso alla sezione trasmittente del CWD. Anche in questo caso è sufficiente implementare solamente tre livelli del protocollo; per quello fisico e data-link sono stati presi in considerazione quelli disponibili sul  $\mu\text{P}$  impiegato per la realizzazione delle schede di controllo del CWD e del CWS.

### 2.4.1 Livelli fisico e data link

Oltre alla porta di comunicazione SPI, le periferiche del  $\mu\text{P}$  comprendono anche due porte CAN (Controller Area Network) [6], e due UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), queste ultime denominate SCI (Serial Communication Interface) nella documentazione del dispositivo [7]. Il protocollo SPI, usato per la gestione dei R/T in radiofrequenza, è stato progettato per scambio di dati su breve distanza tra dispositivi elettronici che risiedono sulla stessa scheda per cui risulta poco adatto alla comunicazione con un PC, che può avvenire su distanze che raggiungono facilmente qualche metro. Inoltre, qualora si utilizzasse il protocollo SPI, sarebbe necessario dotare il PC di una apposita scheda di interfaccia e di una serie di librerie software mediante le quali realizzare un applicativo che gestisca il livello applicazione e l'interfaccia utente per la visualizzazione/immissione dei dati. Il protocollo CAN è molto diffuso in ambito industriale, opera con in bit rate massimo di 1 Mb/s su reti lunghe fino a 20m e potrebbe quindi essere impiegato per la connessione

con un PC, ma anche in questo caso sarebbe necessario dotare il calcolatore di una apposita interfaccia sia hardware che software. Si è scelto quindi di impiegare la porta UART del  $\mu P$ , parametrizzandola in modo da implementare il protocollo RS232, che è semplice, molto diffuso, e di facile gestione. Dal punto di vista hardware la connessione con il PC richiede al più un semplice ed economico adattatore da inserire in una porta USB, mentre per quanto riguarda il software, sono disponibili in rete numerose applicazioni gratuite che consentono di gestire e monitorare la comunicazione, ed è possibile realizzare interfacce grafiche per la visualizzazione/immissione dei dati usando ambienti di sviluppo molto diffusi in ambito universitario e industriale quali Matlab, Visualbasic o Labview.

### 2.4.2 Livello applicazione

Nel realizzare il livello applicazione è stata tenuta in considerazione che è prassi comune impostare i dispositivi che adottano il protocollo RS232 affinché il campo dati di ogni frame sia lungo 8 bit, per cui la formattazione dei messaggi scambiati tra il PC e il CWD è stata definita affinché essi abbiano lunghezza multipla di questa quantità. Risulta quindi possibile scomporre i messaggi in singoli byte ed associare a ognuno di essi un carattere utilizzando la codifica ASCII. Nella definizione del protocollo sono state poste queste specifiche:

1. Possibilità di accedere in lettura e scrittura ad un set di parametri definiti nel firmware delle schede di controllo del CWD.
2. Possibilità di accedere in lettura e scrittura alle variabili interne del firmware durante l'esecuzione del programma di controllo.
3. Codifica dei campi del messaggio usando caratteri alfanumerici in modo da rendere possibile la loro interpretazione anche in assenza di una interfaccia software specifica.

La specifica 2) è stata definita al fine di rendere possibile una qualche forma di monitoraggio del funzionamento interno delle subroutine di controllo del CWD senza che sia necessario effettuare la connessione con l'ambiente di sviluppo integrato del firmware. Tale connessione richiede infatti di interrompere l'esecuzione del firmware stesso e di resettare il  $\mu P$  e pertanto non può essere eseguita mentre il caricabatteria è in funzione. La specifica 3) riduce la velocità di trasmissione effettiva del protocollo perché non impiega tutte le possibili combinazioni di bit nello scambio di dati tra il PC e le schede di controllo; tuttavia si è deciso di implementarla dato che agevola moltissimo la fase di sviluppo del protocollo stesso. Un simile approccio può essere riconosciuto anche nella codifica HTML delle pagine web o nella specifica JSON usata per rappresentare gli oggetti nel linguaggio Javascript.

Lo scambio di dati tra il PC e la scheda di controllo viene sempre iniziato dal PC che invia un messaggio con cui chiede alla scheda di svolgere una certa operazione. La scheda esegue l'operazione richiesta e quindi risponde con un secondo messaggio.

In funzione della specifica operazione, i messaggi di richiesta sono suddivisi in due o tre campi, il primo dei quali è un carattere alfabetico che specifica l'operazione da svolgere seguendo la codifica riportata nella tabella 1.

Nel caso si tratti di una operazione di Read o Write, il successivo campo del messaggio è formato da due caratteri che specificano il parametro su cui operare. Esso viene definito mediante un indice espresso in formato esadecimale, cosicché con due caratteri compresi negli intervalli '0'-'9' e 'A'-'F' possono essere gestiti fino a 255 parametri. Se invece viene richiesta una operazione di Query o Set, il secondo campo del

**Tabella 1. Codifica delle operazioni**

Carattere	Nome del comando	Operazione svolta
r	Read	Lettura un parametro (specificata 1)
w	Write	Scrittura un parametro (specificata 1)
q	Query	Lettura una variabile (specificata 2)
s	Set	Scrittura una variabile (specificata 2)

messaggio viene ancora espresso in formato esadecimale, comprende sei caratteri e specifica l'indirizzo nella memoria del  $\mu P$  della variabile a cui si vuole accedere.

Il terzo campo è presente solo quando si richiedono le operazioni di Write o Set e contiene il valore da assegnare rispettivamente al parametro o alla variabile specificati nel secondo campo. In entrambi i casi il valore viene espresso in formato esadecimale mediante otto caratteri. In questo caso essi rappresentano un valore in virgola mobile a 32 bit codificato mediante lo standard IEEE754 [8] impiegato dal  $\mu P$ .

Il messaggio di risposta comprende due campi. Il primo è formato da una solo carattere e ripete il carattere che codifica l'operazione che era stata richiesta. Il secondo campo contiene otto caratteri e codifica in formato esadecimale il valore del parametro o della variabile di cui era stata richiesta la lettura o la scrittura. In questo secondo caso, la ripetizione del valore che era stato inviato nel messaggio di richiesta consente di verificare che esso sia stato ricevuto ed eseguito correttamente.

### 2.4.3 Risultati sperimentali

Il protocollo descritto nella sezione precedente è stato implementato nel firmware della scheda di controllo della sezione trasmittente del PCWS in forma di una macchina a stati in cui la transizione da uno stato all'altro è determinata dal più recente carattere ricevuto dalla porta seriale. L'evoluzione da uno stato al successivo è suscettibile a bloccarsi nel caso in cui, a causa di guasti o errori, la sequenza dei caratteri ricevuti sia incompleta oppure non rispecchi nessuna delle sequenze definite dal livello applicazione. Per evitare questa situazione è stato inserito un timer che limita a 10ms il tempo disponibile per completare la ricezione di un messaggio di richiesta. Trascorso tale intervallo, la macchina a stati viene resettata e si pone in attesa di un nuovo messaggio.

Nella figura 13 sono riportati alcuni esempi di scambio di dati tra PC e scheda di controllo. I caratteri in blu sono quelli inviati dal PC e costituiscono i messaggi di richiesta mentre i caratteri in verde costituiscono i messaggi di risposta. Nella prima riga viene richiesta la lettura del parametro 0 con il messaggio "r00"; la risposta ripete il codice "r" della richiesta e accoda gli otto caratteri esadecimali "0FDB4049" che rappresentano il contenuto del parametro in formato IEEE754 (corrispondono al decimale 3.14159274). Nella seconda riga viene invece letto il valore del parametro 1, che vale "00003F80" (corrisponde al decimale 0.1). La terza riga chiede di assegnare al parametro 0 ("w00") il valore "F854402D" (corrisponde al decimale 2.71828175), che viene puntualmente riprodotto nel messaggio di risposta. A ulteriore verifica della corretta esecuzione della richiesta precedente, nella quarta riga il parametro 0 viene nuovamente letto ottenendo il risultato corretto. Nella quinta riga viene chiesto di leggere il valore di una variabile ("q") memorizzata all'indirizzo "00D150" (corrisponde al decimale 53584) ottenendo come risposta il valore 0. Quindi alla stessa variabile viene assegnato ("s") il valore "12345678" (corrisponde al decimale 6.81892664e13) e anche in questo caso il messaggio di risposta è coerente con le attese. Come nel caso del parametro 0, nella settima riga viene nuovamente letta la variabile ottenendo in risposta il suo valore aggiornato.

## 2.5 Assistenza alla realizzazione del caricabatteria wireless dinamico prototipale

Parallelamente alla conduzione della attività descritte nei capitoli precedenti è stata fornita assistenza alla ditta incaricata della realizzazione del caricabatteria wireless dinamico prototipale. Nella fase iniziale del progetto è stato organizzato un incontro con i progettisti della ditta nel corso del quale è stato esaminato in

```

r00 r0FDB4049
r01 r00003F80
w00F854402D wF854402D
r00 rF854402D
q00D150 q00000000
s00D15012345678 s12345678
q00D150q12345678

```

Figura 13. Esempio di scambio di dati mediante protocollo seriale

dettaglio il documento che descrive l'attività svolta durante lo scorso anno e che riporta i dati di dimensionamento e le specifiche del prototipo. In questa sede sono state anche illustrate alcune soluzioni realizzative adottate negli anni precedenti dalla Università di Padova nel realizzare il PCWS.

Successivamente è stata fornita assistenza telefonica, principalmente nell'ambito della selezione degli interruttori statici di potenza e dei relativi driver. Anche in questo caso sono state condivise l'esperienza e le conoscenze acquisite durante la progettazione e la realizzazione del prototipo disponibile nel laboratorio SEAV.

Nell'ultima fase del progetto l'assistenza ha riguardato principalmente il protocollo di comunicazione in radiofrequenza. In relazione a questo argomento sono stati scambiati ed esaminati con i tecnici della ditta i data sheet relativi a più modelli di R/T disponibili sul mercato al fine di selezionare quello da impiegare. Nell'ambito di questa collaborazione è anche stato fornito alla ditta il firmware descritto nel capitolo 2.4.

### 3 Conclusioni

Nel corso del progetto l'attività di ricerca e di sperimentazione relativa ai sistemi di ricarica wireless è stata focalizzata sugli argomenti elencati di seguito. Parte dell'attività è stata sviluppata a partire dai risultati raggiunti nel corso dei precedenti progetti.

- *Sperimentazione degli algoritmi di controllo del CWD.*

Al termine del precedente anno erano stati resi disponibili gli algoritmi di controllo per le due sezioni del CWD. Essi erano stati progettati e testati per mezzo di simulazioni svolte negli ambienti PSIM e Matlab. Nel presente anno tali algoritmi sono stati implementati nel PCWS disponibile in laboratorio e il loro funzionamento è stato verificato sperimentalmente.

- *Progetto e implementazione di un sistema automatico per il mantenimento della condizione di risonanza*

La progettazione del caricabatteria wireless è stata effettuata nell'ipotesi che la frequenza della tensione di alimentazione sia uguale alla frequenza di risonanza delle sezioni ricevente e trasmittente. Nel caso del CWD le autoinduttanze delle bobine sono soggette a piccole variazioni durante il movimento del veicolo a causa della presenza dei nuclei ferromagnetici. Tale variazione comporta la perdita della condizione di risonanza e un conseguente degrado delle prestazioni del sistema. E' stato quindi sviluppato un sistema automatico che aggiusta la frequenza della tensione di alimentazione al fine di mantenere la risonanza nonostante le variazioni parametriche delle reti di compensazione.

- *Progettazione e implementazione del sistema di comunicazione in radiofrequenza.*

Nell'ambito delle attività dello scorso anno era stato sviluppato lo schema di controllo della sezione trasmittente del CWD. Esso prevede che quest'ultima riceva dalla sezione ricevente informazioni relative alla tensione del bus in continua posto a valle del raddrizzatore a diodi. Nel corso del presente anno il sistema di comunicazione in radiofrequenza è stato progettato, realizzato e sperimentato impiegando il PCWS come banco prova.

- *Progettazione e implementazione del sistema di comunicazione per la gestione/monitoraggio del caricabatteria wireless.*

Il CWD è un dispositivo prototipale sul quale può eventualmente essere condotta anche attività di ricerca. Risulta utile quindi che i suoi parametri funzionali possano essere facilmente modificati e/o monitorati. A tale scopo è stato realizzato un sistema di comunicazione che consente di accedere a tali parametri per mezzo di

un PC connesso al CWD mediante un protocollo seriale. Anche in questo caso il PCWS è stato usato come banco prova per il sistema di comunicazione seriale.

- *Assistenza alla realizzazione del prototipo.*

Parallelamente alle attività elencate sopra, è stata fornita assistenza alla ditta incaricata della realizzazione del CWD.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. C. Mi, G. Buja, S.Y. Choi, et al. "Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles" IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016; 63(2018), pp. 6533-6545.
2. M. Bertoluzzo, R. Kr. Jha, and G. Buja, "Series-series resonant IPT system analysis under frequency mismatch," atti di IECON 2015, pp. 439 - 444, 2015.
3. Disponibile: [http:// https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P](http://https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P). (Ultimo accesso: 26/09/2018).
4. Disponibile: <http://www.ti.com/lit/ug/sprugp2a/sprugp2a.pdf>. (Ultimo accesso: 27/09/2018).
5. Disponibile: [http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/elettromobilita/2013/rds-par2013-098.pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/elettromobilita/2013/rds-par2013-098.pdf). (Ultimo accesso: 26/09/2018).
6. Disponibile: <http://www.ti.com/lit/ug/sprueu1/sprueu1.pdf>. (Ultimo accesso: 28/09/2018).
7. Disponibile: <http://www.ti.com/lit/ug/sprufz5a/sprufz5a.pdf>. (Ultimo accesso: 28/09/2018)
8. Disponibile: [https://it.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_754](https://it.wikipedia.org/wiki/IEEE_754). (Ultimo accesso: 27/09/2018).

## 5 Appendice - Curriculum

Manuele Bertoluzzo è professore associato del settore scientifico disciplinare "Convertitori, macchine ed azionamenti elettrici" presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, dove tiene gli insegnamenti di "Enertronica" e di "Veicoli elettrici stradali". Ha svolto attività di ricerca nei campi della mobilità elettrica e delle applicazioni industriali elettriche. In tema di mobilità elettrica, ha progettato, realizzato ed effettuato attività sperimentali su apparati prototipali per la ricarica wired e wireless di veicoli elettrici, su powertrain con motori ruota e con diverse tipologie di alimentazione: accumulatori agli ioni di litio, celle a combustibile e sistemi di immagazzinamento misto dell'energia accumulatori-supercondensatori. In tema di applicazioni industriali elettriche, ha sviluppato e sperimentato schemi per il controllo di motori asincroni e sincroni a magneti permanenti, e reti di campo sia event-triggered che time-triggered per il governo di sistemi elettrici critici dal punto di vista della sicurezza.