



Ricerca di Sistema elettrico

V2H - Studio, progetto e sperimentazione di un sistema di ricarica wireless con funzionalità Vehicle to Home

Manuele Bertoluzzo



Report RdS/PTR2019/016

V2H - STUDIO, PROGETTO E SPERIMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI RICARICA WIRELESS CON FUNZIONALITÀ VEHICLE TO HOME

Manuele Bertoluzzo (Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Mobilità

Linea di attività: 13 *Determinazione delle specifiche di progetto, delle modalità operative e dell'architettura del sistema V2H wireless*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "V2H - Studio, progetto e sperimentazione di un sistema di ricarica wireless con funzionalità Vehicle to Home"

Responsabile scientifico ENEA: Antonino Genovese

Responsabile scientifico UNIPD-DII : Manuele Bertoluzzo

Indice

SOMMARIO.....	4
INTRODUZIONE.....	5
1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA WIRELESS PER IL V2H.....	5
1.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEI SISTEMI WPT.....	5
1.2 SCHEMA DI PRINCIPIO DEL SISTEMA WIRELESS PER IL V2H	6
2 SPECIFICHE FUNZIONALI DEL SISTEMA WIRELESS PER IL V2H	8
2.1 NORMA CEI 0-21	8
2.2 RECOMMENDED PRACTICE SAE J2954	10
3 SPECIFICHE INGRESSO-USCITA DEL SISTEMA WIRELESS PER IL V2H.....	12
4 DIMENSIONAMENTO DELLE BOBINE DI ACCOPPIAMENTO E DELLE RETI DI COMPENSAZIONE.....	16
4.1 DIMENSIONAMENTO DEL RADDRIZZATORE ATTIVO E DEL CONVERTITORE CC/CC.....	16
4.2 TENSIONI DISPONIBILI ALL'USCITA DELL'INVERTITORE AD ALTA FREQUENZA E ALL'INGRESSO DEL RADDRIZZATORE AD ALTA FREQUENZA	19
4.3 ANALISI DELLE RETI DI COMPENSAZIONE PROPOSTE NEL RP J2954	19
4.4 DIMENSIONAMENTO DELLE RETI BOBINE DI ACCOPPIAMENTO E DELLE RETI DI COMPENSAZIONE.....	20
5 MODALITÀ OPERATIVE.....	23
5.1 GESTIONE DELLE MODALITÀ DI CARICA E DI SCARICA DELLA BATTERIA	23
5.2 MODALITÀ DI CARICA DELLA BATTERIA	25
5.3 MODALITÀ DI SCARICA DELLA BATTERIA.....	26
6 CONCLUSIONI.....	27
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	28
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	29
8.1 PEDICI.....	30
9 APPENDICE	30
10 RINGRAZIAMENTI.....	30

Sommario

Lo scopo del progetto “V2H - Studio, progetto e sperimentazione di un sistema di ricarica wireless con funzionalità Vehicle to Home” è la realizzazione di un caricabatteria per veicoli elettrici destinato all’uso domestico, con la capacità di gestire flussi di energia bidirezionali e basato sulla tecnologia della trasmissione della potenza mediante accoppiamento induttivo.

Nel corso del Piano Annuale di Realizzazione 2019 del progetto sono state affrontate le tematiche relative alla determinazione della architettura circuitale del prototipo di Sistema Wireless per il Vehicle to Home (SWV2H) che verrà realizzato nel corso dell’ultimo Piano Annuale di Realizzazione del progetto, alla definizione delle sue specifiche di funzionamento e modalità operative, al dimensionamento delle bobine di accoppiamento e delle reti di compensazione.

L’attività è iniziata con la consultazione della letteratura riguardante i sistemi wireless per il trasferimento bidirezionale di potenza. Essa ha consentito di reperire informazioni relative ad alcuni schemi circuitali che consentirebbero di ridurre il peso e l’ingombro della sezione posta a terra del sistema di ricarica. Queste architetture però sono in grado di trasferire a bordo del veicolo solo una potenza pulsante, sottoponendo la batteria ad una sollecitazione che ne ridurrebbe la vita operativa. Si è quindi preferito adottare per il prototipo una architettura più tradizionale, simile a quella studiata nei precedenti progetti.

La consultazione della norma CEI 0-21 relativa all’allacciamento in rete di utenti attivi ha fornito indicazioni relative alla gestione dei flussi di potenza bidirezionali, in particolare riguardo alle condizioni della rete che abilitano l’utente a effettuare l’immissione di potenza e all’ammontare delle potenze attiva e reattiva che possono essere scambiate in funzione di dette condizioni. Dal documento J2954 rilasciato dalla SAE sono state ottenute indicazioni circa la frequenza della tensione di alimentazione delle bobine di accoppiamento, la geometria delle bobine stesse e la topologia delle reti di compensazione.

Le informazioni attinte dai due documenti hanno consentito di fissare le specifiche funzionali del sistema wireless, definendo come esso debba interagire con la rete elettrica domestica. Successivamente, sulla base delle caratteristiche della rete elettrica domestica e della batteria di accumulatori posta a bordo del veicolo, è stato effettuato il dimensionamento ingresso-uscita e del prototipo determinando le specifiche elettriche per i convertitori statici direttamente collegati rispettivamente alla rete e alla batteria.

L’insieme dei dati derivanti dalle specifiche ingresso/uscita, dalla architettura circuitale prescelta e dalle indicazioni delle normative è stato impiegato per effettuare il dimensionamento delle bobine di accoppiamento e dei condensatori che costituiscono le reti di compensazione. Nell’effettuare questa operazione è stato necessario definire preliminarmente alcuni parametri di funzionamento dei convertitori statici che costituiscono il sistema wireless. È stato quindi ritenuto conveniente completare l’elaborazione ricavando anche le informazioni relative al dimensionamento di massima dei principali componenti circuitali di tali convertitori, con lo scopo di assicurarsi che le scelte progettuali effettuate non comportassero l’instaurarsi di sollecitazioni eccessive.

Quale passo preliminare allo sviluppo degli algoritmi di controllo del SWV2H è stato definito un diagramma di flusso che descrive ad alto livello le modalità operative del sistema e le condizioni che impongono il suo funzionamento nella modalità di carica della batteria oppure in quella di scarica. Date le differenze esistenti nella gestione delle due modalità, per ognuna di esse è stato sviluppato un diagramma di flusso specifico. I diagrammi analizzano solamente il comportamento ingresso/uscita del sistema, considerando le sue interazioni con la rete elettrica domestica e con la batteria. I dettagli relativi alla effettiva attuazione delle operazioni riportate nei diagrammi saranno sviluppati con la progettazione degli opportuni algoritmi di controllo durante il prossimo Piano Annuale di Realizzazione del progetto.

Introduzione

Scopo del progetto intitolato “V2H - Studio, progetto e sperimentazione di un sistema di ricarica wireless con funzionalità Vehicle to Home” è la realizzazione di un sistema prototipale nel quale la batteria di accumulatori a bordo di un veicolo elettrico è collegata alla rete domestica di una abitazione mediante un sistema bidirezionale che impiega la tecnologia nota come “Wireless Power Transfer” (WPT). Essa consente alla batteria di scambiare potenza elettrica con la rete domestica senza che venga stabilito alcun contatto galvanico tra il veicolo e l’impianto elettrico dell’abitazione [1], [2].

Oltre a svolgere la funzione di ricaricare la batteria di bordo, il sistema WPT deve essere in grado di gestire anche flussi di potenza diretti dal veicolo verso la rete domestica per alimentare in tutto o in parte i carichi domestici, implementando la funzionalità cosiddetta di tipo “Vehicle to Home” (V2H) [3], [4]; per questo motivo il sistema è denominato “Sistema Wireless per il V2H” (SWV2H). Per mezzo della connessione della rete domestica alla rete di distribuzione, il SWV2H può anche operare in modalità “Vehicle to Grid” (V2G), svolgendo servizi in favore della rete di distribuzione che prevedono di trasferire verso di essa parte dell’energia immagazzinata nella batteria.

Un tipico modus operandi del SWV2H consiste nell’usare l’energia immagazzinata nella batteria per alimentare una parte o la totalità dei carichi domestici nei momenti di maggior carico della rete di distribuzione, quando il costo dell’energia è elevato, ripristinando lo stato di carica della batteria in un secondo momento, quando il carico sulla rete è minore e il costo dell’energia è più basso. Il SWV2H effettua quindi una funzione di livellamento del carico a favore della rete di distribuzione e consente all’utente un risparmio sui costi dell’energia. L’azione a favore della rete è resa più incisiva se parte della energia prelevata dalla batteria viene immessa nella rete di distribuzione; infatti, in tal caso, il SWV2H può svolgere anche funzioni di regolazione di tensione o di frequenza.

Il progetto di un SWV2H presenta interessanti aspetti di innovazione perché, se è vero che gli impianti di produzione domestica di energia sono abbastanza diffusi, in particolare quelli che impiegano pannelli fotovoltaici, tuttavia l’utilizzo della batteria di un veicolo elettrico come dispositivo di immagazzinamento dell’energia per un’utenza domestica non ha ancora trovato una applicazione commerciale, tantomeno se interfacciamento con la rete domestica è effettuato mediante un sistema wireless.

1 Descrizione del Sistema Wireless per il V2H

1.1 Principio di funzionamento dei sistemi WPT

Il fenomeno fisico su cui è basato il funzionamento dei caricabatteria WPT per veicoli elettrici è l’induzione di tensione prodotta da campi magnetici variabili. Essa viene realizzata mediante una bobina posta a terra che induce una tensione ai capi di una bobina installata a bordo del veicolo. Affinché l’induzione avvenga è necessario che la bobina a terra sia alimentata da una corrente alternata; ovviamente la tensione indotta è anche essa alternata e ha la stessa frequenza della corrente di alimentazione della bobina a terra. Applicando un carico ai capi della bobina a bordo si attua una trasmissione di potenza tra la sezione a terra del sistema WPT e la sezione a bordo del veicolo senza che esse siano collegate galvanicamente. Data l’intrinseca simmetria del fenomeno dell’induzione magnetica, è possibile attuare un trasferimento di potenza anche in senso inverso, alimentando con corrente alternata la bobina a bordo del veicolo e collegando un carico ai capi della bobina a terra.

Si dimostra che all’aumentare della frequenza di alimentazione della bobina che opera come trasmittente aumenta anche l’efficienza del trasferimento di potenza tra le due bobine mentre le dimensioni richieste per queste ultime diminuiscono. Per questo motivo, nel funzionamento come caricabatteria, la bobina a terra non è alimentata direttamente dalla rete elettrica ma tramite un convertitore statico ca/ca che inietta nella bobina una corrente con frequenza molto più elevata di quella di rete. Poiché la ricarica della batteria di bordo dei veicoli elettrici viene effettuata in corrente continua, è necessario inserire un convertitore ca/cc tra la bobina a bordo e la batteria. Oltre ad effettuare il raddrizzamento della tensione indotta il

convertitore ca/cc regola la corrente assorbita dalla batteria per effettuarne la carica secondo i profili di corrente e tensione specificati dal costruttore [5].

È prassi comune dei progettisti di sistemi WPT inserire tra le bobine e i convertitori statici le cosiddette reti di compensazione, circuiti passivi formati da elementi reattivi che compensano in tutto o in parte la reattanza delle bobine. Sono state studiate numerose topologie di reti di compensazione, progettate per scopi diversi quali la massimizzazione dell'efficienza della trasmissione di potenza o la minimizzazione della sensibilità del sistema agli errori di allineamento tra le bobine [6], [7]. Tra le topologie più semplici di reti di compensazione si ricordano quella serie e quella parallelo; esse prevedono l'inserzione di un solo condensatore, connesso in serie oppure in parallelo alla relativa bobina e dimensionato per risuonare con l'induttanza della bobina stessa alla frequenza di alimentazione delle bobine [8]. La risonanza forza la corrente che fluisce nelle bobine ad assumere una forma d'onda praticamente sinusoidale anche se, come spiegato nel prossimo capitolo, la tensione di alimentazione applicata alla bobina che opera come

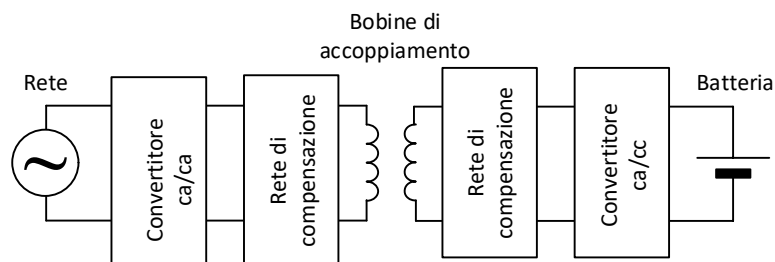


Figura 1. Architettura complessiva di un sistema WPT.

trasmettente ha una forma d'onda semi-quadra.

L'architettura complessiva di un sistema WPT si presenta dunque come in Figura 1.

1.2 Schema di principio del Sistema Wireless per il V2H

Nella maggior parte dei prototipi di sistemi WPT presentati in letteratura e nei pochi dispositivi commerciali disponibili sul mercato il convertitore ca/ca connesso alla rete domestica è costituito da un raddrizzatore a diodi dotato di un circuito per la "Power Factor Correction" (PFC) e seguito da un invertitore ad alta frequenza (IAF); tra il raddrizzatore e lo IAF è posto un condensatore di capacità tale da mantenere la tensione sul lato in continua dello IAF sufficientemente livellata da consentirgli il corretto funzionamento. Il convertitore ca/cc a valle della rete di compensazione della bobina a bordo è costituito dalla cascata di un raddrizzatore a diodi ad alta frequenza e di un convertitore cc/cc (CCC), spesso realizzato mediante un chopper di tipo buck; anche in questo caso tra i due convertitori è posto un condensatore che livella la tensione all'uscita del raddrizzatore. Un sistema WPT con la configurazione circuitale sopra descritta non è in grado di gestire flussi di potenza bidirezionali e quindi non può implementare entrambe le modalità operative previste per il SWV2H. Affinché esse possano essere attuate è necessario che tutti i convertitori statici presenti nel caricabatteria wireless siano di tipo bidirezionale.

Alcuni autori hanno proposto di realizzare sistemi WPT bidirezionali e contemporaneamente di ridurre l'ingombro e il costo della sezione a terra e di aumentarne l'affidabilità utilizzando un unico convertitore a matrice in sostituzione della cascata del raddrizzatore a diodi con PFC e dello IAF, eliminando il condensatore posto nel lato in continua del raddrizzatore [9], [10]. In effetti, i convertitori a matrice offrono una buona alternativa per realizzare una conversione ca/ca dal momento che consentono di ottenere una conversione della tensione di rete in una tensione ad alta frequenza senza richiedere l'interposizione di un bus in continua. Tuttavia essi sono realizzati impiegando numerosi interruttori statici bidirezionali, che a loro volta sono ottenuti collegando in serie due interruttori statici convenzionali, per cui le cadute di tensione ai loro capi risultano superiori a quelle dei convertitori tradizionali. Inoltre, un accurato controllo delle forme d'onda della corrente in ingresso può essere ottenuto solo mediante l'impiego di complicati algoritmi di controllo e di sincronizzazione delle commutazioni degli interruttori, cosicché la realizzazione e l'impiego dei convertitori a matrice risultano piuttosto complessi. Altri lavori presentano un convertitore ca/ca in configurazione "back to back" nella quale il raddrizzatore con PFC è sostituito con un raddrizzatore attivo (RA) bidirezionale e viene eliminato il condensatore che sostiene la tensione del bus in continua.

Mediante opportuni algoritmi di comando del RA e dello IAF il convertitore ca/ca risultante è in grado di controllare efficacemente la forma d'onda della corrente prelevata dalla rete di alimentazione. Oltre alla configurazione "back to back" sono state proposte anche altre configurazioni circuitali più semplici, che iniettano energia nella bobina che opera a terra solamente durante un semiperiodo della corrente che vi circola e utilizzano la risonanza della rete di compensazione per mantenere la corrente in circolazione nell'altro semiperiodo.

Il problema comune a queste configurazioni è che la potenza trasferita dal convertitore ca/ca alla bobina a terra, e quindi al carico, non è costante e si azzer periodicamente quando la tensione di rete è nulla. Il problema è intrinseco alla alimentazione dalla rete monofase nel caso in cui non venga utilizzato un dispositivo per immagazzinare parte della energia fornita dalla rete quando la tensione è prossima al valore di picco ed erogarla quando la tensione è prossima allo zero. Questa è appunto la funzione svolta dal condensatore presente tra il raddrizzatore con PFC e lo IAF nei sistemi WPT con configurazione convenzionale. L'assenza di tale elemento associata alla necessità di caricare la batteria con una potenza costante al fine di non sottoporla a inutili sollecitazioni richiederebbe di inserire un dispositivo di immagazzinamento nella sezione del sistema WPT posta a bordo del veicolo, esacerbando così gli inconvenienti di peso e ingombro eliminati nella sezione a terra.

Sulla scorta di queste considerazioni e tenendo conto della esperienza maturata nel corso di precedenti progetti sui sistemi WPT [11], [12], si ritiene conveniente realizzare la sezione a terra del SWV2H mediante un RA interfacciato ad uno IAF mediante un bus in tensione continua. Il RA, implementato con la topologia nota come "ponte ad H" e comandato con la tecnica della PWM, consente di effettuare un efficace controllo della forma d'onda della corrente assorbita da rete e, quindi, di mantenerla sinusoidale e di imporle la richiesta relazione di fase rispetto alla tensione. Il RA consente inoltre di regolare il valore medio della tensione raddrizzata, a patto che essa risulti comunque superiore al valore di picco della tensione di rete; quest'ultima essendo una condizione necessaria per consentire il controllo della corrente all'ingresso del RA. Lo IAF ha la stessa topologia del RA ma viene controllato in modo diverso. In linea di principio, gli interruttori statici che costituiscono lo IAF potrebbero essere comandati in onda quadra imponendo un ritardo di fase di 180° tra i comandi delle due gambe e agendo sulla tensione sul lato in continua del RA per regolare la componente fondamentale della tensione sul lato in alternata dello IAF. Poiché però la tensione sul lato in continua del RA non può scendere al di sotto del valore di picco della tensione di rete si otterrebbe un intervallo di regolazione piuttosto limitato per la componente fondamentale della tensione generata dallo IAF; di conseguenza quest'ultimo viene controllato con la tecnica della cancellazione di tensione [5], nota anche come "phase shift", che consente di regolare la componente fondamentale della tensione sul lato in alternata da un valore massimo fino al valore nullo. Anche la sezione del sistema WPT a bordo del veicolo deve essere realizzata mediante convertitori bidirezionali; pertanto il raddrizzatore a diodi ad alta frequenza sarà sostituito con un raddrizzatore attivo ad alta frequenza (RAF) che adotta la stessa topologia dello IAF mentre il CCC impiegherà una topologia che opera in modalità buck nel trasferire potenza verso la batteria e in modalità boost quando il flusso di potenza avviene in senso inverso.

Concludendo, lo schema circuitale del SWV2H risulta quello riportato in Figura 2. Per completezza sono stati rappresentati anche l'induttanza di accoppiamento L_i del RA verso rete, l'induttanza di uscita L_o del CCC e i condensatori C_{IAF} e C_{CCC} che sostengono i bus in continua rispettivamente all'uscita del RA e del RAF; per semplificare lo schema sono state disegnate reti di compensazione di tipo serie per entrambe le bobine. Lo schema riporta anche alcune tensioni e correnti fondamentali nel descrivere il funzionamento del SWV2H e le cui ampiezze saranno ricavate in sede di dimensionamento del SWV2H. Le grandezze variabili,

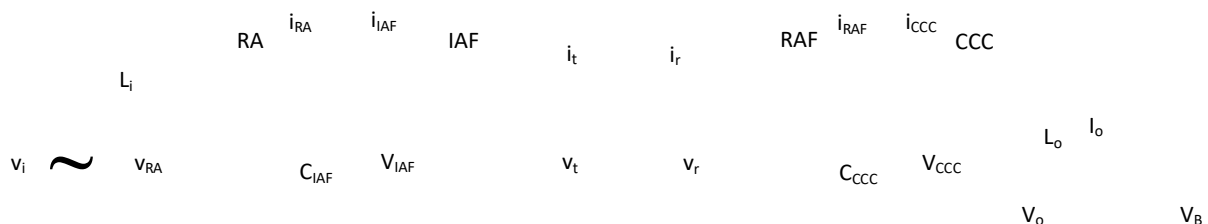


Figura 2. Schema di principio del SWV2H.

tipicamente sinusoidi o onde semiquadrate, sono indicate con lettere minuscole mentre le grandezze costanti o quasi costanti sono indicate con lettere maiuscole; queste ultime sono utilizzate nei prossimi capitoli anche per indicare le ampiezze delle grandezze sinusoidali. Nel seguito, al fine di evitare ambiguità dovute alla possibilità di gestire flussi di potenza bidirezionali, l'ingresso del SWV2H e dei vari convertitori sarà sempre inteso sul lato orientato verso la rete domestica mentre l'uscita corrisponderà al lato orientato verso la batteria.

2 Specifiche funzionali del Sistema Wireless per il V2H

Nell'interfacciarsi alla rete domestica e, tramite essa, alla rete di distribuzione, il SWV2H deve soddisfare i requisiti posti dalla norma CEI 0-21 riguardante la connessione degli utenti alla rete di distribuzione in bassa tensione. Inoltre, allo scopo di sviluppare un SWV2H le cui sezioni a terra e a bordo siano compatibili con le rispettive sezioni complementari sviluppate da altre aziende, esso è progettato, per quanto possibile, in ottemperanza con la "Recommended Practice" J2954 pubblicate dalla Society of Automotive Engineers (SAE) e riguardanti i caricabatteria wireless.

2.1 Norma CEI 0-21

Le specifiche fornite da ENEA prevedono che il SWV2H sia alimentato da una presa domestica per cui la tensione v_i all'ingresso del RA ha ampiezza nominale di picco pari a

$$V_{i,N} = 230\sqrt{2} \text{ V} = 325 \text{ V} \quad (1)$$

con valore minimo e massimo rispettivamente di

$$V_{i,m} = 0.9 \cdot V_{i,N} = 293 \text{ V} \quad (2)$$

$$V_{i,M} = 1.1 \cdot V_{i,N} = 358 \text{ V} \quad (3)$$

e frequenza nominale

$$f_{i,N} = 50 \text{ Hz} \quad (4)$$

La corrente e la potenza attiva che possono essere assorbite da una presa domestica sono rispettivamente

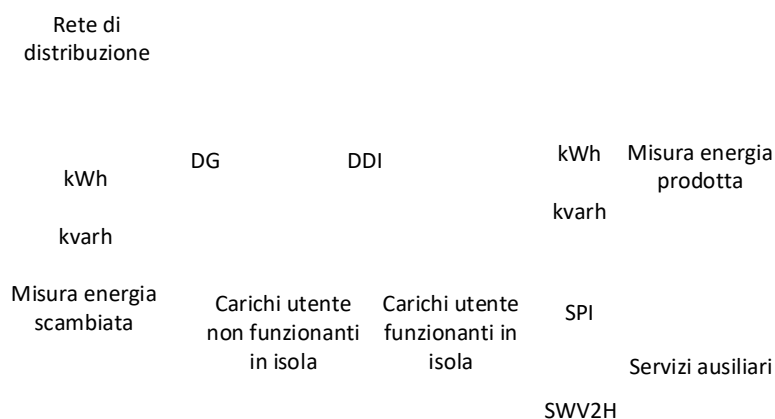
$$P_{i,N} = 3.3 \text{ kW} \quad (5)$$

$$I_{i,N} = 16\sqrt{2} \text{ A} = 22.6 \text{ A} \quad (6)$$

La principale funzione del SWV2H è la carica della batteria del veicolo elettrico per cui esso è assimilabile agli altri carichi domestici mentre opera in questa modalità. Al verificarsi di determinate condizioni, parte dell'energia immagazzinata nella batteria potrà essere scaricata verso la rete domestica, con la possibilità che la potenza iniettata sia temporaneamente superiore a quella assorbita dall'insieme degli altri carichi domestici, instaurando così un flusso netto di potenza verso la rete di distribuzione. In questa modalità di funzionamento l'utenza domestica complessiva (UDC), costituita dal SWV2H, dalla rete domestica e dai carichi ad essa collegati, viene vista dalla rete di distribuzione come un impianto di produzione piuttosto che come un utente passivo per cui trova applicazione la norma CEI 0-21 intitolata "Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica" [13]. Essa ha come obiettivo la definizione dei criteri tecnici per la connessione degli utenti alle reti elettriche di distribuzione in corrente alternata con tensione nominale fino a 1 kV.

Secondo tale norma, la UDC va considerata tra gli utenti classificati come "impianti di produzione e utilizzazione" e rientra nella categoria dei "carichi distorcenti" data la presenza del RA all'ingresso del SWV2H che, operando mediante la tecnica della PWM, immette in rete armoniche di corrente ad alta frequenza; la UDC è anche un impianto di produzione "disturbante" poiché l'energia è immessa in rete mediante un dispositivo distorcente, quale è appunto il RA. A causa dei carichi domestici la UDC non può essere considerata un puro produttore di energia, e viene perciò inquadrata nella norma come "utente attivo con carico proprio". Infine, il SWV2H va considerato come un "generatore statico", o "indirettamente

Se invece si prevede che il SWV2H alimenti la UDC in isola, per esempio in caso di guasto della rete di distribuzione, la norma richiede che tra il DG e la rete domestica sia interposto il “dispositivo di interfaccia” (DDI) che ha la funzione di evitare che l’utente alimenti la rete di distribuzione in presenza di valori anomali



Oltre alle specifiche per la connessione alla rete di distribuzione, la norma fornisce anche alcuni dettagli relativi alle modalità operative degli utenti e pone una serie di restrizioni volte ad assicurare l'integrità della rete di distribuzione e dell'impianto utente. In particolare, il funzionamento dell'utente non deve causare perturbazioni sulla rete stessa per cui sono fissati i limiti sul contenuto armonico della corrente assorbita dalla rete. Inoltre, per gli utenti attivi, il funzionamento in parallelo alla rete di distribuzione può essere iniziato solamente se l'ampiezza della tensione della rete stessa è compresa tra $0.85 V_{i,N}$ e $1.1 V_{i,N}$ e la sua frequenza è compresa tra 49.9 Hz e 50.1 Hz, con possibilità di espandere questo intervallo di frequenza, su

richiesta del gestore della rete, fino ad una estensione massima compresa tra 49 Hz e 51 Hz. Se la tensione e la frequenza cadono all'interno degli intervalli prefissati l'utente può iniziare l'immissione di potenza in rete seguendo un profilo a rampa avente pendenza non superiore a $0.2 P_{i,N}$ al minuto. Una volta connesso alla rete, l'utente attivo deve mantenere la sincronizzazione con la rete in un intervallo di frequenza compreso tra 47.5 Hz e 51.5 Hz. Al di fuori di questo intervallo lo SPI comanda la disconnessione dell'utente.

Si richiede inoltre che il convertitore presente nell'impianto utente sia in grado di scambiare con la rete

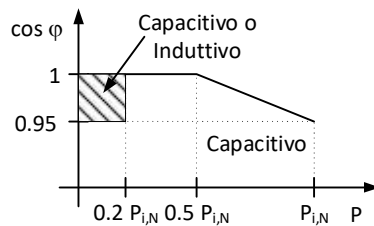


Figura 4. $\cos\phi$ in funzione della potenza prodotta.

anche potenza reattiva, il cui ammontare è determinato da leggi di controllo locali che tengono conto delle condizioni della rete. In particolare, la massima potenza reattiva scambiata dipende dalla potenza nominale dell'utente attivo ed è definita per mezzo del $\cos\phi$. Nel caso di utenti attivi con potenza nominale tra 3kW e 6kW si richiede che essi siano in grado di operare con $\cos\phi$ compreso tra 1 e 0.95. Le leggi di controllo locali, pure specificate nella norma, esprimono il legame tra la potenza attiva immessa in rete e il $\cos\phi$ mediante il grafico in Figura 4.

Dall'analisi del grafico si nota come per l'erogazione di potenze attive fino a $0.2 P_{i,N}$ non è richiesta nessuna regolazione per cui l'utente attivo può avere un comportamento induttivo o capacitivo purché $\cos\phi$ sia compreso tra 1 e 0.95; per potenze attive comprese tra $0.2 P_{i,N}$ e $0.5 P_{i,N}$ l'utente deve operare con $\cos\phi$ unitario, mentre per potenze attive superiori a $0.5 P_{i,N}$ l'utente deve assorbire potenza reattiva di tipo capacitivo e il $\cos\phi$ deve scendere linearmente fino a 0.95.

L'erogazione di potenza reattiva viene abilitata quando l'ampiezza della tensione della rete supera il valore di lock-in, che è comunicato dal gestore di rete ed è impostabile tra il valore nominale $V_{i,N}$ della tensione di rete e $1.1 V_{i,N}$. L'erogazione di potenza reattiva viene disabilitata quando la tensione di rete è inferiore al valore di lock-out, impostabile su richiesta del gestore tra $0.9 V_{i,N}$ e $V_{i,N}$. Prescrizioni simili sono date anche riguardo la riduzione della potenza attiva iniettata in rete in funzione della frequenza di rete. La normativa infatti stabilisce che per frequenza comprese tra 47.5 Hz e 50.3 Hz l'utente attivo possa erogare la potenza nominale; per frequenze superiori a 50.3 Hz la potenza massima erogabile è ridotta linearmente fino a zero, che viene raggiunto quando la frequenza della rete è 51.5 Hz. La riconnessione alla rete dopo una disconnessione causata da un transitorio di frequenza prevede un accrescimento graduale della potenza immessa in rete, seguendo anche in questo caso un andamento a rampa ma con pendenza massima pari al 20% al minuto della potenza immessa prima della disconnessione.

2.2 Recommended Practice SAE J2954

La Society of Automotive Engineers (SAE) ha pubblicato una serie di "Recommended Practices" (RP) riguardanti numerosi aspetti relativi alla standardizzazione dei veicoli. Alcune delle RP riguardano i veicoli elettrici e quella indicata con la sigla J2954 tratta specificatamente della ricarica wireless della batteria di bordo [14]. Lo scopo del documento è fissare i criteri per l'interoperabilità di sistemi di ricarica prodotti da aziende diverse, definire le prestazioni minime in termini di sicurezza e compatibilità elettromagnetica, stabilire le procedure di misura e collaudo per tali sistemi. La versione corrente della RP J2954 prende in considerazione solamente sistemi di ricarica unidirezionali rimandando a successive versioni del documento l'esame dei sistemi bidirezionali.

La RP J2954 classifica i sistemi WPT alla massima potenza apparente assorbita da rete e alla distanza tra il suolo e il punto più basso della bobina installata a bordo. Si definiscono così quattro classi di potenza

denominate rispettivamente WPT1, WPT2, WPT3 e WPT4 alle quali corrispondono i valori massimi di potenza apparente di 3.7 kVA, 7.7 kVA, 11.1 kVA e 22 kVA. Le tre classi relative alla distanza da terra della bobina a bordo sono denominate Z1, Z2, Z3 e corrispondono a distanze comprese negli intervalli 100 mm-150 mm, 140 mm-210 mm e 170 mm-250 mm.

Il SWV2H considerato nel progetto ricade quindi nella classe di potenza WPT1. Riguardo la classe relativa alla distanza da terra, si ritiene che il limite inferiore della classe Z1 sia troppo basso per permettere un uso realistico del veicolo in tutte le condizioni operative, come ad esempio la guida su una strada dissestata, per cui appare ragionevole assegnare al SWV2H la classe di distanza Z2. Quindi, secondo le convenzioni SAE, il SWV2H oggetto di questo studio è un sistema wireless WPT1/Z2.

Per le classi di potenza WPT1, WPT2 e WPT3 si prevede una efficienza minima di trasferimento della energia, misurata come rapporto tra la potenza iniettata nella batteria e la potenza attiva assorbita dalla rete, pari a 85% nella condizione di bobine allineate e uguale a 80% nel caso esse siano disallineate. Il disallineamento è convenzionalmente considerato pari a 75 mm nella direzione X, corrispondente con la direzione del moto del veicolo, e a 100 mm nella direzione Y, ortogonale alla direzione X. Inoltre, le specifiche di efficienza devono essere garantite anche quando la bobina a bordo presenta un angolo di rollio o di beccheggio di $\pm 2^\circ$ rispetto a quella a terra o una rotazione di $\pm 10^\circ$. Per la classe WPT4 i limiti di efficienza non sono ancora stati definiti. La frequenza di alimentazione nominale $f_{HF,N}$ per le bobine a terra è fissata a 85 kHz per tutte le classi ed il suo valore effettivo può variare tra il valore minimo $f_{HF,m}=79$ kHz e il massimo $f_{HF,M}=90$ kHz.

La RP J2954 prescrive un certo grado di interoperabilità tra le classi cosicché, ad esempio, una bobina a terra progettata per la classe di potenza WPT1 deve essere in grado di trasferire energia ad una bobina a bordo progettata per la classe di potenza WPT2 e, viceversa, una bobina a terra della classe WPT2 deve trasferire potenza ad una bobina a bordo della classe WPT1. Allo stesso modo una bobina a terra progettata per una certa classe di distanza deve essere in grado di trasferire potenza anche alle bobine a bordo progettate per le classi di distanza inferiori. Nel caso di scambio di energia tra bobine appartenenti a classi diverse non si richiede di soddisfare anche la specifica riguardante la minima efficienza di trasferimento dell'energia.

Il documento tratta brevemente anche la questione dello scambio di informazioni via radio tra la sezione a terra e la sezione a bordo del sistema WPT. Questo canale di comunicazione può essere impiegato per guidare il posizionamento del veicolo sulla piazzola di parcheggio in modo da ottenere il corretto allineamento tra le bobine e, una volta che è iniziato il processo di trasferimento dell'energia, per permettere alla sezione a bordo di inviare alla sezione a terra il valore di riferimento per la potenza da trasferire. Per la comunicazione è utilizzato lo standard IEEE 802.11p, appositamente sviluppato per lo scambio di informazioni tra veicoli in movimento ad alta velocità e tra i veicoli stessi e la infrastruttura a terra; esso è una versione modificata dello standard 802.11 su cui sono basati i vari protocolli Wi-Fi.

Nella parte finale della RP J2954 sono riportati i disegni quotati delle bobine delle classi WPT1 e WPT2 da usare come riferimento nella progettazione dei sistemi WPT destinati alla produzione di serie. Mediante questi progetti, una azienda che abbia sviluppato un sistema WPT può collaudare la sua interoperabilità con quelli di altre aziende prima di immetterlo sul mercato. A tale scopo l'azienda deve verificare che l'accoppiamento tra una delle bobine sviluppate in proprio e quella complementare realizzata secondo i progetti riportati nella RP soddisfi tutte le specifiche di efficienza, sicurezza e compatibilità prescritte dalla normativa.

Per quanto il documento non ne parli in forma esplicita, gli schemi circuitali in cui compaiono i valori numerici delle grandezze elettriche riportano per la batteria un valore di tensione compreso tra 280 V e 420 V e per la rete di alimentazione monofase una tensione di 240 V_{rms} e una frequenza di 60 Hz. La topologia di compensazione che compare negli schemi è di tipo LCL per la bobina a terra e di tipo parallelo oppure LCL per la bobina a bordo. In particolare, le reti di compensazione per un sistema della classe WPT1/Z2, come quello oggetto di studio, hanno la topologia riprodotta in Figura 5 e i loro componenti hanno le reattanze elencate in Tab. 1. Il coefficiente di accoppiamento tra la bobina a terra e la bobina a bordo previsto per un sistema WPT1/Z2 è compreso tra 0.085 e 0.221.

Tabella 1. Componenti delle reti di compensazione riportate in RP J2954.

Sezione a terra		Sezione a bordo	
L_1	212 μH – 223 μH	L_2	207 μH – 214 μH
C_{1sa}, C_{1sb}	40.4 nF	C_{2Sa}, C_{2Sb}	33.8 nF
C_{f1}	120 nF	L_{2Sa}, L_{2Sb}	11.7 μH
L_{f1a}, L_{f1b}	23.5 μH	C_{2P}	150 nF
		L_{3Sa}, L_{3Sb}	19.0 μH

3 Specifiche ingresso-uscita del Sistema Wireless per il V2H

Le specifiche relative alle grandezze elettriche presenti all'ingresso e all'uscita del SWV2H sono determinate considerando rispettivamente i limiti imposti dalla norma CEI 0-21 e quelli derivanti dalle caratteristiche della batteria di bordo. In questa sede l'attenzione verrà posta sul dimensionamento dei convertitori statici di energia elettrica e sul fatto che essi devono gestire flussi di potenza bidirezionali. Compatibilmente con la funzionalità V2H prevista dal progetto, le caratteristiche del SWV2H saranno determinate in modo soddisfare quanto prescritto dalla norma CEI 0-21 e dalla RP J2954. Parti accessorie del sistema, non strettamente legate alla conversione dell'energia, ad esempio i dispositivi di protezione e distacco dalla rete o i protocolli di comunicazione usati per l'allineamento delle bobine, non verranno considerati in questa sede.

La RP J2954 stabilisce che la tensione all'ingresso del RA sia leggermente superiore alla $V_{i,N}$ specificata dalla norma CEI 0-21 ma tale differenza può essere trascurata senza problemi. Anche l'impiego della frequenza di rete di 60 Hz, come riportato nel documento statunitense, non pregiudica il funzionamento di un sistema dimensionato per una rete che operi a 50 Hz.

Il SWV2H è soggetto alla massima sollecitazione quando assorbe la potenza nominale $P_{i,N}$. Durante le modalità di carica o scarica della batteria è possibile che il SWV2H lavori a questo livello di potenza per periodi di tempo relativamente lunghi per cui questo valore stabilisce la potenza attiva nominale assorbita dal SWV2H. In base alla medesima considerazione, l'ampiezza della corrente nominale all'ingresso è fissata a $I_{i,N}$.

Per quanto riguarda l'uscita del SWV2H, le specifiche fornite da ENEA richiedono di effettuare la carica di una batteria avete tensione nominale di

$$V_{B,N} = 96 \text{ V} \quad (7)$$

La batteria è costituita da 30 celle al litio modello WB-LYP100Ah prodotte dalla ditta Winston. Si tratta di celle di tipo LiFePO_4 , caratterizzate da una tensione di lavoro nominale di 3.2 V, tensione minima di 2.5 V e tensione massima di 3.65 V; di conseguenza la tensione di lavoro della batteria risulta compresa tra 75 V e 109 V e la tensione di uscita del SWV2H deve poter variare in questo intervallo. Il produttore delle celle specifica inoltre che le correnti nominali di carica e scarica sono di 50 A mentre i corrispondenti valori massimi raggiungono i 300 A; inoltre è ammesso che la corrente di scarica raggiunga picchi di 1000 A.

Nel punto di transizione tra la di carica a tensione costante e quella a corrente costante la tensione di batteria raggiunge il valore di fine carica mentre la corrente di carica è ancora massima; supponendo che la carica sia effettuata con la corrente nominale di 50 A, la potenza iniettata nella batteria sarebbe pari a 5.45

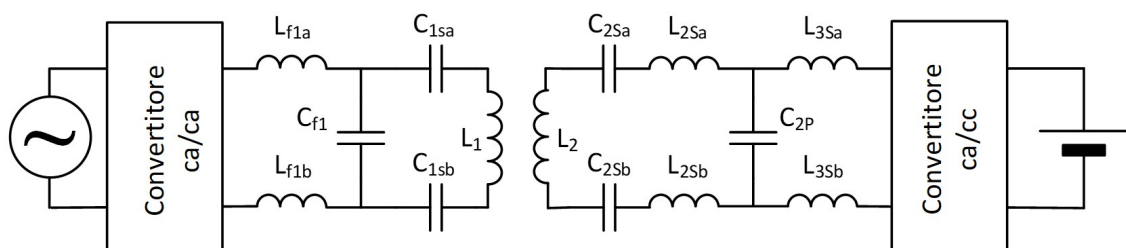


Figura 5. Reti di compensazione riportate in RP J2954.

Tabella 2. Caratteristiche delle celle al litio.

Tipo cella	V_N [V]	V_m [V]	V_M [V]	n	$V_{B,m}$ [V]	$V_{B,M}$ [V]
LiFePO₄	3.2	2.5	3.65	30	75	109
LiMn ₂ O ₄	3.7	3.0	4.2	26	78	109
LiNiMnCoO ₂	3.6	3.0	4.2	27	81	113
LiCoO ₂	3.6	3.0	4.2	27	81	113
LiNiCoAlO ₂	3.6	3.0	4.2	27	81	113
Li ₂ TiO ₃	2.4	1.8	2.85	40	72	114

kW. Essa supera abbondantemente $P_{i,N}$ e pertanto corrisponde a una condizione di funzionamento non raggiungibile dal SWV2H. La potenza di uscita del SWV2H è quindi dimensionata considerando la limitazione posta alla potenza $P_{i,N}$ disponibile all'ingresso.

Poiché esistono numerosi tipi di celle al litio, ognuno caratterizzato dal proprio intervallo di tensioni di lavoro, è stata valutata la possibilità di usare il SWV2H per caricare o scaricare batterie aventi la stessa tensione nominale ma composte da celle di tipo diverso. Nella Tabella 2 sono considerati sei tipi di celle al litio; per ognuno di essi sono riportati la tensione nominale, la tensione di lavoro minima e massima, il numero di celle necessario a costituire una batteria con tensione nominale pari a $V_{B,N}$, e le corrispondenti tensione di batteria minime e massime. Le caratteristiche delle celle WB-LYP100Ah sono evidenziate in grassetto.

Dall'analisi della tabella emerge che, fissando i seguenti valori $V_{o,m}$ e $V_{o,M}$ come minimo e massimo dell'intervallo di tensione di lavoro all'uscita del SWV2H

$$V_{o,M} = 65 \text{ V} \quad (8)$$

$$V_{o,m} = 120 \text{ V} \quad (9)$$

esso risulterà compatibile con tutti i tipi di celle considerati mantenendo anche un piccolo margine di tolleranza di funzionamento.

La RP J2954 richiede al SWV2H una efficienza complessiva η_{tot} pari ad almeno 85%. Da precedenti esperienze si può ritenere che l'efficienza di trasferimento tra le due bobine superi il 90%, per cui è ragionevole supporre che essa possa essere uguale a

$$\eta_t = 0.92. \quad (10)$$

Ipotizzando in prima approssimazione che tutti convertitori statici del SWV2H (RA, IAF, RAF, CCC) abbiano la stessa efficienza η_c , si ricava che essa deve essere almeno uguale a

$$\eta_c = 0.98. \quad (11)$$

per rispettare la prescrizione della RP J2954.

Assorbendo dalla rete domestica la potenza $P_{i,N}$, il CCC inietterà nelle batteria la potenza

$$P_{o,N,c} = \eta_{tot} P_{i,N} = 2.80 \text{ kW} \quad (12)$$

dove i pedici "N,c" indicano che si tratta della potenza nominale durante la fase di carica.

La corrispondente corrente di uscita del CCC raggiunge il valore massimo quando ai capi della batteria è presente la tensione minima. Poiché durante la carica della batteria il valore massimo della corrente è mantenuto per un tempo molto più lungo della costante di tempo termica degli interruttori statici che costituiscono i convertitori, esso corrisponde con il valore nominale della corrente di lavoro all'uscita del SWV2H durante la carica e risulta pari a

$$I_{o,N,c} = \frac{P_{B,N,c}}{V_{B,m}} = 37.4 \text{ A} \quad (13)$$

Come prevedibile, il valore di corrente in (13) risulta inferiore alla massima corrente di carica della batteria; effettuando la carica con la corrente data dalla (13) il tempo di carica risulterà maggiore, ma al contempo si otterrà un prolungamento della vita operativa della batteria a seguito dei ridotti stress termici.

Nella fase di scarica della batteria verso rete, il surplus di corrente che essa è in grado di generare rispetto a $I_{o,N,c}$ può essere utilizzato per mantenere la potenza iniettata in rete uguale a $P_{i,N}$ nonostante l'efficienza non unitaria del SWV2H. Ipotezzando che l'efficienza dei singoli convertitori e delle bobine accoppiate sia indipendente dalla direzione del flusso di potenza, si ricava che per iniettare in rete la potenza $P_{i,N}$ è necessario che il CCC estragga dalla batteria la potenza

$$P_{o,N,s} = \frac{P_{i,N}}{\eta_{tot}} = 3.88kW \quad (14)$$

dove i pedici "N,s" indicano che si tratta della potenza nominale durante la fase di scarica.

Nelle condizioni peggiori di funzionamento della batteria, che si hanno quando la tensione ai suoi capi è al valore minimo, l'estrazione della potenza $P_{o,N,s}$ richiede che il CCC assorba dalla batteria una corrente pari a

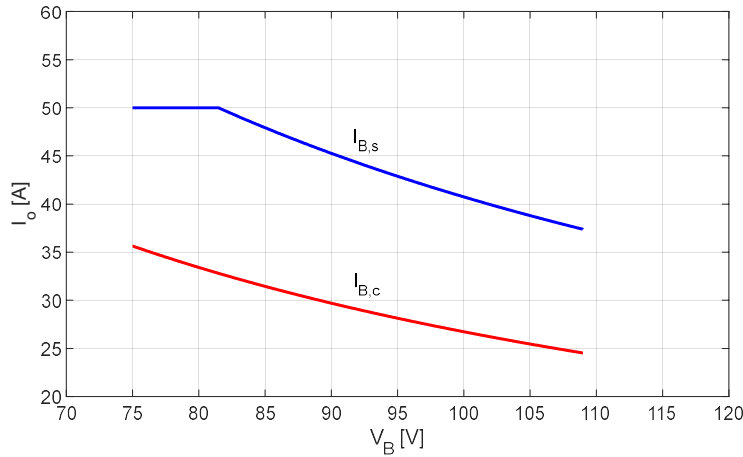


Figura 6. Correnti di carica $I_{B,c}$ e di scarica $I_{B,s}$ della batteria in funzione della tensione V_B di batteria

$$I_{o,N,s} = \frac{P_{B,N,s}}{V_{B,m}} = 51.7A \quad (15)$$

Questo valore è pochissimo diverso dalla corrente nominale di scarica della batteria indicata dal costruttore, pari a 50 A. Si fissa pertanto a 50 A il valore massimo della corrente all'uscita del SWV2H durante la fase di scarica senza che ciò pregiudichi più di tanto la potenza che il SWV2H rende disponibile alla rete domestica.

Come conseguenza di questa scelta, nell'ipotesi di scambiare con la rete domestica la massima potenza possibile sia durante la carica che la scarica della batteria, la corrente iniettata o assorbita dalla batteria varia in funzione della sua tensione secondo i grafici riportati nella Figura 6, ottenuti dalle equazioni

$$I_{o,c} = \frac{P_{i,N}\eta_{tot}}{V_B} \quad (16)$$

$$I_{o,s} = \begin{cases} \frac{P_{i,N}/\eta_{tot}}{V_B} & \text{se } \frac{P_{i,N}/\eta_{tot}}{V_B} \leq 50 \\ 50 & \text{se } \frac{P_{i,N}/\eta_{tot}}{V_B} > 50 \end{cases} \quad (17)$$

Nella figura grafici delle correnti sono calcolati considerando la tensione di batteria compresa nell'intervallo $(V_{B,m}, V_{B,M})$, ottenuto dalla prima riga della Tabella 2; l'asse delle ascisse si estende invece sull'intero intervallo $(V_{o,m}, V_{o,M})$ in modo da evidenziare il posizionamento dell'intervallo della tensione di lavoro della batteria rispetto a quello ammissibile all'uscita del CCC.

È ovvio che sia nel caso della carica che in quello della scarica è possibile far funzionare il SWV2H con valori inferiori di potenza e, quindi, di corrente.

Quando il SWV2H opera in modalità di carica, una volta che la tensione di batteria raggiunge il valore di fine carica la corrente all'uscita del CCC è gradualmente ridotta per mantenere tale tensione costante. Dato che in queste condizioni la corrente fornita dal CCC non superare $I_{o,N,c}$, la fase a tensione costante della carica della batteria non influisce nel dimensionamento del SWV2H e quindi essa non è necessario analizzarla in dettaglio. Le specifiche di dimensionamento per l'ingresso e l'uscita del SWV2H sono riportati in Tabella 3. In ottemperanza alla normativa CEI 0-21 durante la fase di scarica della batteria verso rete il RA all'ingresso del SWV2H deve operare con $0.95 < \cos\varphi < 1$. Nel caso in cui $\cos\varphi$ assuma il valore minimo $\cos\varphi_m = 0.95$, per iniettare in rete la potenza attiva nominale è necessario che la corrente di ingresso sia uguale a

$$I_i = \frac{2 \cdot P_{i,N}}{V_{i,N} \cos\varphi_m} = 19.4 \text{ A} \quad (18)$$

Nel caso la tensione di rete sia minore di $V_{i,N}$ è possibile erogare verso rete la massima potenza attiva e contemporaneamente operare con $\cos\varphi = 0.95$ senza superare la corrente nominale fino al valore minimo di V_i dato da

$$V_i = \frac{2 \cdot P_{i,N}}{I_{i,N} \cos\varphi_m} = 308 \text{ V} \quad (19)$$

Esso risulta maggiore di $V_{i,m}$, che a sua volta è uguale al minimo valore di lock-out, per cui potrebbe accadere che se V_i è inferiore al valore calcolato in (19) il SWV2H debba ridurre la potenza attiva erogata verso rete per soddisfare contemporaneamente alle specifiche riguardanti il $\cos\varphi$ e il valore nominale della corrente in ingresso.

Sempre secondo la norma CEI 0-21, la potenza attiva erogata deve essere ridotta linearmente in funzione della frequenza di rete qualora essa superi i 50.3 Hz. In tali condizioni, per mantenere il richiesto valore di



Figura 7. Denominazione delle potenze scambiate tra le sezioni del SWV2H.

Tabella 4. Potenze scambiate tra gli stadi del SWV2H.

	Rete	RA+IAF	RAF+CCC	Batteria
Carica	$P_{i,N,c} = 3.3 \text{ kW}$	$P_{IAF,N,c} = 3.17 \text{ kW}$	$P_{RAF,N,c} = 2.92 \text{ kW}$	$P_{o,N,c} = 2.80 \text{ kW}$
Scarica	$P_{i,N,s} = 3.3 \text{ kW}$	$P_{IAF,N,s} = 3.43 \text{ kW}$	$P_{RAF,N,s} = 3.73 \text{ kW}$	$P_{o,N,s} = 3.88 \text{ kW}$

$\cos\varphi$, anche la potenza reattiva dovrà essere ridotta in modo proporzionale alla potenza attiva. Se la frequenza di rete supera i 51.26 Hz la potenza attiva immessa in rete deve scendere a $0.2 P_{i,N}$ per cui, in accordo con la Figura 4, la potenza reattiva viene azzerata al fine di portare il valore del $\cos\varphi$ a 1.

Conoscendo i valori della potenza attiva $P_{i,N}$ scambiata all'ingresso del SWV2H, delle potenze di uscita $P_{o,N,c}$ e $P_{o,N,s}$ in condizioni di carica e di scarica e una stima delle efficienze dei convertitori è possibile determinare le potenze attive scambiate tra i diversi stadi del sistema nelle due modalità operative. I simboli usati per

Tabella 3. Valori di dimensionamento per l'ingresso e l'uscita del SWV2H.

Grandezza	Simbolo	Valore
Tensione di ingresso	$V_{i,M}$	358 V
Corrente di ingresso	$I_{i,N}$	22.6 A
Tensione di uscita	$V_{o,M}$	120 V
Corrente di uscita (carica)	$I_{o,N,c}$	37.4 A
Corrente di uscita (scarica)	$I_{o,N,s}$	50 A

rappresentare tali potenze sono rappresentati in Figura 7 mentre i loro valori sono riportati nella Tabella 4. Sia nel tracciare la figura che nel compilare la tabella gli elementi reattivi che costituiscono le reti di compensazione sono stati considerati ideali e quindi le loro perdite sono state trascurate.

4 Dimensionamento delle bobine di accoppiamento e delle reti di compensazione

Come mostrato in Figura 2, le bobine di accoppiamento e le relative reti di compensazione sono l'elemento centrale della catena di stadi di conversione che costituisce il SWV2H. Il dimensionamento dei parametri induttivi delle bobine e di quelli reattivi delle reti di compensazione dipende fortemente dai parametri di funzionamento dello IAF e del RAF, e più specificatamente dalle tensioni e correnti presenti all'uscita dello IAF e all'ingresso del RAF. A loro volta queste grandezze derivano dai valori di dimensionamento di ingresso e uscita del SWV2H, riportati in Tabella 3, e dai parametri di funzionamento del RA e del CCC, che fissano i valori massimi delle grandezze presenti rispettivamente alla uscita del RA e all'ingresso del CCC. Di conseguenza il dimensionamento delle bobine e delle reti di compensazione può essere effettuato solamente dopo che siano stati dimensionati, almeno parzialmente, i vari convertitori statici, partendo da quelli più esterni e convergendo verso quelli centrali.

Parallelamente al calcolo delle tensioni e delle correnti presenti all'ingresso e all'uscita dei convertitori è apparso opportuno effettuare anche un dimensionamento preliminare dei principali componenti passivi (induttori, condensatori) e attivi (transistori, diodi) che li costituiscono per verificare che le scelte effettuate a proposito della architettura del sistema non comportino l'applicazione a tali componenti di sollecitazioni elettriche troppo elevate rispetto alla consueta pratica ingegneristica. I risultati preliminari così ottenuti saranno verificati nel corso del Piano Annuale di Realizzazione 2020 del progetto, dopo che saranno stati realizzati i modelli circuitali per la simulazione del SWV2H e sarà quindi possibile avere una stima più accurata delle ampiezze delle grandezze elettriche nelle diverse modalità di funzionamento del sistema.

4.1 Dimensionamento del Raddrizzatore Attivo e del Convertitore CC/CC

L'ingresso del RA è collegato alla rete domestica mediante l'induttore L_i che ha la duplice funzione di disaccoppiare la tensione sinusoidale di rete dalla tensione modulata ad alta frequenza presente all'ingresso del RA e di ridurre il contenuto armonico della corrente in rete. Nel dimensionare L_i è prassi imporre che in condizioni nominali ai suoi capi cada una tensione pari al $0.45 V_{i,N}$ [15]; quindi si può calcolare L_i mediante la

$$L_i = \frac{0.45 \cdot V_{i,N}}{\omega_{i,N} I_{i,N}} = 20.6 \text{ mH} \quad (20)$$

dove con $\omega_{i,N}$ si è indicata la pulsazione nominale della tensione di rete.

Il valore assegnato a L_i dovrebbe essere sufficiente a garantire il soddisfacimento delle specifiche relative al contenuto armonico della corrente riportate nella norma CEI EN 61000-3-2. Questa affermazione sarà verificata nel corso del prossimo Anno di Realizzazione del progetto mediante l'analisi numerica del funzionamento del RA.

L'ampiezza della componente fondamentale $V_{RA,1}$ che deve essere disponibile all'ingresso del RA può essere ricavata dal circuito equivalente di Figura 8a e dal relativo diagramma fasoriale di Figura 8b. Quest'ultimo si riferisce al funzionamento del RA nella modalità di carica della batteria, ma i risultati ottenuti valgono anche nel caso funzionamento in modalità di scarica.

La caduta di tensione sull'induttore di filtro L_i deve essere controbilanciata da un aumento della componente fondamentale della tensione all'ingresso di RA e questo effetto è tanto più sensibile quanto più è sfasata la corrente I_i rispetto alla tensione V_i , come si ricava dalla seguente espressione di $V_{RA,1}$

$$V_{RA,1} = \sqrt{\omega_i^2 I_i^2 L_i^2 + V_i^2 + 2\omega_i I_i V_i L_i \sin(\varphi)} \quad (21)$$

L'analisi della (21) mostra che $V_{RA,1}$ è massima nella condizione di corrente nominale, tensione di rete massima e $\cos\varphi=0.95$, per cui si ottiene

$$V_{RA,1,M} = 427 \text{ V} \quad (22)$$

Trascurando le cadute di tensione sugli interruttori statici del RA, $V_{RA,1,M}$ deve essere uguale alla tensione del bus in continua posto all'uscita di RA e sostenuto dal condensatore C_{IAF} . Per consentire un corretto funzionamento del RA stesso e dello IAF collegato in cascata, la tensione ai capi del condensatore deve essere mantenuta ragionevolmente costante, pur ammettendo che ad essa sia sovrapposta un'oscillazione causata dall'andamento pulsante della potenza scambiata con la rete domestica.

Si assuma che il condensatore C_{IAF} assorba tutta la componente alternata della corrente i_{RA} , ottenuta per raddrizzamento della corrente di ingresso del RA. Essa produce ai capi del condensatore una oscillazione di tensione con frequenza doppia rispetto a quella di rete e ampiezza massima data da

$$\Delta V_{IAF} = \frac{I_{i,N}}{i_{i,N} C_{IAF}} 2 \int_{\arcsin \frac{2}{\pi}}^{\frac{\pi}{2}} \sin(\theta) d\theta = \frac{I_{i,N}}{i_{i,N} C_{IAF}} 2 \left[\sqrt{1 - \frac{4}{\pi^2}} - 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{2}{\pi}\right) \right] \quad (23)$$

Dalla (23) si ricava che, per limitare l'oscillazione di tensione al valore ragionevole di 25 V, è necessario installare un condensatore avente capacità almeno uguale a

$$C_{IAF} = 1.21 \text{ mF} \quad (24)$$

Le componenti alternate della corrente i_{IAF} all'ingresso dello IAF, che hanno la componente fondamentale alla frequenza $2 f_{HF}$ non possono circolare nella rete elettrica grazie all'azione di L_i e pertanto vengono assorbite dal condensatore C_{IAF} . Mediante la (23) il condensatore è stato dimensionato affinché l'effetto di

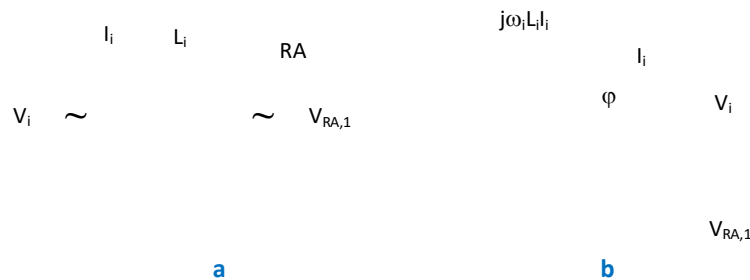


Figura 8. Circuito equivalente dell'ingresso del RA (a) e relativo diagramma fasoriale (b).

i_{RA} sulla tensione ai suoi capi sia trascurabile; dal momento che la corrente i_{IAF} ha una frequenza 1700 volte superiore a quella di i_{RA} è plausibile trascurare l'ondulazione che essa produce su V_{IAF} e pertanto il valore ottenuto con il precedente dimensionamento del condensatore rimane valido.

Assumendo un margine di sicurezza di circa 25 V per il corretto funzionamento del SWV2H, la tensione media di lavoro V_{IAF} del bus in continua viene quindi fissata a

$$V_{IAF} = 450 \text{ V} \quad (25)$$

Questo valore è uguale quello indicato nella RP J2954 e corrisponde, a parte le oscillazioni di 12.5 V in più o in meno alle quali è soggetta la tensione ai capi di C_{IAF} , alla tensione che devono sostenere gli interruttori statici che costituiscono il RA e lo IAF. Similmente, la massima tensione a cui è sottoposto l'induttore L_i risulta uguale a $V_{IAF} + V_{i,M}$. La massima corrente che fluisce negli interruttori statici, in L_i e in C_{IAF} è uguale a $I_{i,N}$.

Nella Tabella 3 la tensione di uscita massima $V_{o,M}$ del CCC è fissata a 120 V. Tenendo conto della caduta di tensione sugli interruttori statici che costituiscono il CCC è necessario che la tensione V_{CCC} al suo ingresso sia leggermente superiore a $V_{o,M}$; per garantire un certo margine di operatività essa è fissata a

$$V_{CCC} = 130 \text{ V} \quad (26)$$

Questa tensione coincide con quella presente all'uscita del RAF e pertanto V_{CCC} è la massima tensione sostenuta sia dagli interruttori statici che costituiscono il RAF che da quelli del CCC. Gli interruttori statici e i diodi di ricircolo di quest'ultimo sono percorsi dalla corrente massima $I_{o,N,s}$, pari a 50 A.

Tra il CCC e la batteria è interposta l'induttanza L_o che ha la duplice funzione di disaccoppiare la tensione modulata presente all'uscita del CCC dalla tensione lentamente variabile della batteria e di ridurre le oscillazioni della corrente I_o iniettata in batteria al fine di preservarne la vita operativa. Durante la fase di carica a tensione costante la corrente iniettata nella batteria scende gradualmente fino ad annullarsi. Si può ragionevolmente fissare il termine della carica quando la corrente si riduce a $0.05 I_{B,N,c}$ e imporre questo valore come limite massimo della oscillazione picco-picco della corrente I_o al fine di assicurare la conduzione continua della corrente durante tutto il processo di carica.

Indicando con δ il duty cycle del segnale di comando dell'interruttore statico superiore del CCC, in condizioni di regime e trascurando la resistenza parassita della induttanza L_o , vale la relazione

$$\delta = \frac{V_B}{V_{CCC}} \quad (27)$$

Supponendo di lavorare in condizioni di conduzione continua, la variazione picco-picco della corrente I_o è data da

$$\Delta I_o = \frac{1}{L_o} V_B (1 - \delta) T_{CCC} \quad (28)$$

dove T_{CCC} è il periodo di commutazione del CCC.

Dall'analisi delle (27) e (28) si ricava che il valore massimo di ΔI_o si raggiunge quando $V_B = V_{CCC}/2$ e che, superato questo valore, ΔI_o decresce all'aumentare di V_B . Dalla Tabella 2 si ricava che il valore minimo di V_B si ha con celle del tipo Li_2TiO_3 e che esso risulta comunque maggiore della metà di V_{CCC} ; di conseguenza il valore massimo di ΔI_o viene raggiunto proprio caricando questo tipo di celle, quando la tensione della batteria assume il valore minimo indicato come $V_{B,\text{Li}_2\text{TiO}_3,m}$.

Nell'ipotesi che la frequenza di commutazione del CCC sia la stessa dello IAF e del RAF l'oscillazione di corrente viene mantenuta entro i limiti desiderati scegliendo per L_o il valore minimo di

$$L_o = \frac{V_{B,\text{Li}_2\text{TiO}_3,m} \left(1 - \frac{V_{B,\text{Li}_2\text{TiO}_3,m}}{V_{CCC}} \right) T_{CCC}}{\frac{I_{B,N,c}}{20}} = 259 \mu\text{H} \quad (29)$$

La massima corrente scorre in L_o durante la scarica della batteria ed è pari a $I_{o,N,s}$ mentre la massima tensione applicata ai suoi capi è $V_{o,M}$.

Il dimensionamento del condensatore C_{CCC} è eseguito seguendo la stessa procedura utilizzata per il condensatore C_{IAF} . La corrente all'ingresso del CCC ha ampiezza

$$I_{CCC} = \frac{I_o}{2} \quad (30)$$

e costituisce la componente continua della corrente all'uscita del RAF. Quest'ultima ha la forma d'onda di una sinusoide raddrizzata con ampiezza pari a

$$I_{RAF} = \frac{\pi I_o}{2} \quad (31)$$

e frequenza doppia di quella di commutazione. Applicando la (23) opportunamente adattata, considerando le condizioni peggiori, che si hanno per i valori minimi del duty-cycle e della frequenza di alimentazione delle bobine e imponendo che la variazione di tensione ai capi di C_{CCC} sia pari a $0.1 V_{CCC}$, si ottiene il valore minimo di progetto per C_{CCC} , dato da

$$C_{CCC} = 540 \mu\text{F} \quad (32)$$

4.2 Tensioni disponibili all'uscita dell'Invertitore ad Alta Frequenza e all'ingresso del Raddrizzatore ad Alta Frequenza

Come accennato precedentemente, l'elevata frequenza richiesta alla tensione di uscita dello IAF non consente di impiegare la tecnica della PWM per regolare l'ampiezza della sua componente fondamentale dal momento che ciò porterebbe a frequenze di commutazione dello IAF troppo elevate. Di conseguenza, nella modalità di carica della batteria, lo IAF sarà controllato con la tecnica della cancellazione di tensione. Essa consente di ottenere all'uscita dello IAF una tensione semiquadra la cui componente fondamentale ha frequenza pari alla frequenza di commutazione dello IAF, fissata a f_{HF} , e ampiezza

$$V_{t,1} = \frac{4}{\pi} V_{IAF} \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (33)$$

dove σ è l'angolo di ritardo tra i comandi degli interruttori statici delle due gambe del ponte ad H con il quale è realizzato lo IAF. Il valore massimo della componente fondamentale di tensione viene raggiunto quando i comandi sono ritardati di π . Trascurando la caduta di tensione sugli interruttori statici, la tensione all'uscita dello IAF diventa un'onda quadra con ampiezza della componente fondamentale pari a

$$V_{t,1,M} = \frac{4}{\pi} V_{IAF} = 573 \text{ V} \quad (34)$$

In questa modalità di funzionamento, la soluzione di controllo più semplice per il RAF consiste nel mantenere spenti gli interruttori statici e affidare ai diodi di ricircolo collegati in antiparallelo ad essi il compito di raddrizzare la tensione presente al suo ingresso. Nella ragionevole ipotesi che il flusso di potenza verso la batteria avvenga durante tutto il periodo di alimentazione della bobina a terra, in ogni istante ci sono due diodi del RAF in conduzione, per cui al suo ingresso è presente una tensione ad onda quadra in fase con la corrente i_r e con ampiezza della componente fondamentale data dalla

$$V_{r,1,M} = \frac{4}{\pi} V_{CCC} = 153 \text{ V} \quad (35)$$

Quando il SWV2H opera nella modalità di scarica della batteria verso la rete domestica, lo IAF funziona da raddrizzatore e il RAF opera da invertitore. Mantenendo le stesse tecniche di controllo descritte sopra si avrà pertanto all'ingresso del RAF una tensione semiquadra alla frequenza f_{HF} e con componente fondamentale di ampiezza controllabile secondo la

$$V_{r,1} = \frac{4}{\pi} V_{CCC} \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (36)$$

e valore massimo coincidente con la (35).

All'uscita dello IAF si avrà una tensione a onda quadra, in fase con la corrente i_t e con ampiezza della componente fondamentale uguale alla (34).

4.3 Analisi delle reti di compensazione proposte nel RP J2954

L'analisi delle prestazioni delle bobine e delle reti di compensazione proposte dalla RP J2954 è stata condotta solamente per il processo di carica della batteria dal momento che il documento non contempla sistemi WPT bidirezionali; inoltre, seguendo lo schema circuitale presentato nella RP, nel condurre l'analisi si è supposto di collegare la batteria direttamente al RAF senza l'interposizione del CCC. Come in precedenza, si è ipotizzato che il trasferimento di potenza avvenga durante tutto il periodo di alimentazione delle bobine, pertanto all'ingresso del RAF è presente una tensione ad onda quadra in fase con la corrente i_r e con ampiezza della componente fondamentale data dalla (35). È stato anche ipotizzato che, come accade nei sistemi WPT risonanti, la corrente i_r all'ingresso del RAF sia sinusoidale; da questa ipotesi deriva che la corrente iniettata nella batteria, pari al valore medio della corrente i_r raddrizzata, è

$$I_o = \frac{2}{\pi} i_r \quad (37)$$

Poiché la tensione v_r è in fase con i_r , sostituendo V_{CCC} con V_B nella (35) si deduce che il circuito in cascata formato dal RAF, dal CCC e dalla batteria è equivalente ad un carico resistivo con resistenza di valore

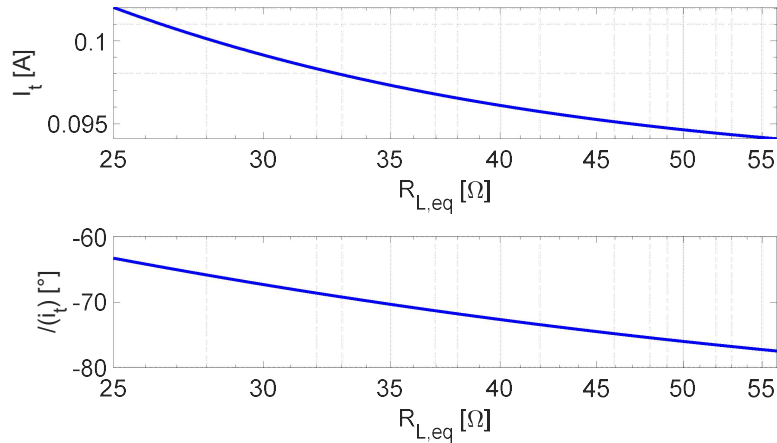


Figura 9. Ampiezza e fase della corrente i_t in funzione del carico equivalente.

$$R_{L,eq} = \frac{8 V_B}{\pi^2 I_o} \quad (38)$$

collegato al posto del RAF e che rappresenta la resistenza di carico della bobina a bordo. Supponendo che il sistema WPT operi con una efficienza pari a 85% iniettando nella batteria una potenza uguale a $P_{o,N,c}$, e che la tensione V_B sia compresa tra 280 V e 420 V, per la resistenza del carico equivalente si ottengono valori compresi tra 25 Ω e 56 Ω .

Il funzionamento del SWV2H è stato esaminato sostituendo il convertitore ca/cc e la batteria presenti nello schema di Figura 5 con la resistenza equivalente calcolata secondo la (38) e supponendo che la rete di compensazione della bobina trasmittente sia alimentata con un generatore di tensione sinusoidale di ampiezza unitaria e frequenza pari a f_{HF} . Il comportamento del circuito è stato poi analizzato numericamente per diversi valori di $R_{L,eq}$ appartenenti all'intervallo sopra indicato per studiare come variano le grandezze elettriche in dipendenza del carico. A titolo di esempio, in Figura 9 sono riportati i grafici dell'ampiezza e della fase della corrente fornita dal generatore di tensione, che nel SWV2H corrisponde allo IAF.

Dalla Figura 9 emerge che l'impedenza vista all'uscita dello IAF ha una cospicua componente reattiva che dipende dal carico. Operando in queste condizioni, lo IAF dovrebbe essere dimensionato per una potenza apparente molto maggiore della potenza attiva trasferita. Da un esame più approfondito del circuito è risultato che nell'intervallo di $R_{L,eq}$ considerato, ma anche per valori notevolmente maggiori o minori della resistenza equivalente, è sempre possibile trovare un valore della frequenza di alimentazione della bobina a terra che ricade nell'intervallo ammesso dalla RP J2954 e che rende puramente resistiva l'impedenza vista all'uscita del IAF. Questo risultato lascia supporre che nelle intenzioni della SAE il sistema WPT debba essere in grado di aggiustare automaticamente la frequenza di alimentazione delle bobine al variare del carico per mantenere un fattore di potenza elevato.

Considerando questa ulteriore complicazione, ricordando che le tensioni di batteria previste dalla RP J2954 sono circa tre volte superiori a quella che effettivamente è presente nel prototipo del progetto, e che le reti di compensazione proposte non sono state progettate per un funzionamento bidirezionale, si è ritenuto opportuno dimensionare ex novo le bobine di accoppiamento e le reti di compensazione con l'obiettivo di soddisfare integralmente le specifiche per il SWV2H.

4.4 Dimensionamento delle reti bobine di accoppiamento e delle reti di compensazione

Vista l'esperienza maturata nei precedenti progetti e data la necessità di avere un comportamento simmetrico del SWV2H per entrambe le direzioni del flusso di potenza, si è stabilito di impiegare delle reti di compensazione di tipo risonante serie. Questo tipo di compensazione forza la corrente nelle bobine ad assumere una forma d'onda praticamente sinusoidale cosicché anche le tensioni indotte risultano sinusoidali; inoltre, per ogni bobina, viene annulla la caduta di tensione reattiva presente ai capi della serie formata dalla induttanza della bobina stessa e dalla capacità risonante. Di conseguenza le tensioni indotte

ai capi delle bobine risultano idealmente uguali alla componente fondamentale delle tensioni presenti alla uscita dello IAF e del RAF, indicate con v_t e v_r in Figura 2 e le correnti i_t e i_r risultano rispettivamente in fase o in controfase rispetto a tali tensioni indipendentemente dal carico equivalente e a seconda della direzione del flusso di potenza. Queste proprietà consentono di semplificare la schematizzazione del SWV2H di Figura 2 rappresentando le tensioni all'uscita dello IAF e all'ingresso del RAF mediante due generatori di tensione sinusoidale e usando due ulteriori generatori per rappresentare le tensioni indotte sulle bobine. Si ottiene così lo schema riportato in Figura 10, dove le resistenze R_t e R_r sono usate per rappresentare le perdite negli avvolgimenti e nel nucleo delle bobine.

Durante la carica della batteria la presenza di R_t e R_r richiede allo IAF di generare una tensione con componente fondamentale maggiore di quelle indotta sulla bobina a terra e rende disponibile all'ingresso del RAF una tensione con componente fondamentale minore di quella indotta sulla bobina a bordo. Convenzionalmente si possono esprimere questi fenomeni mediante le relazioni

$$V_{t,1} = \frac{H_{F,N} M I_r}{\sqrt{\eta_t}} \quad (39)$$

$$V_{r,1} = \omega_{HF,N} M I_t \sqrt{\eta_t} \quad (40)$$

nelle quali $\omega_{HF,N} = 2\pi \cdot f_{HF,N}$ è la pulsazione di alimentazione della bobina a terra. Dalle (39) e (40) quali si ricava che

$$P_{IAF,c} = \frac{V_{t,1} I_t}{2} = \frac{1}{2} \frac{H_{F,N} M I_r I_t}{\sqrt{\eta_t}}, P_{RAF,c} = \frac{V_{r,1} I_r}{2} = \frac{1}{2} \omega_{HF,N} M I_r I_t \sqrt{\eta_t} \Rightarrow \frac{P_{RAF,c}}{P_{IAF,c}} = \eta_t \quad (41)$$

in accordo con la definizione di η_t . Equazioni simili possono essere scritte anche relativamente al processo di scarica.

Quando è abilitata la modalità di carica all'ingresso del RAF è presente la tensione $V_{r,1,M}$. Supponendo di caricare la batteria con la potenza $P_{o,N,c}$ la potenza all'ingresso del RAF deve essere $P_{RAF,N,c}$ per cui la corrente i_r ha ampiezza

$$I_{r,N,c} = \frac{2P_{RAF,N,c}}{V_{r,1,M}} = 35.2 \text{ A} \quad (42)$$

che viene considerato il valore nominale della corrente all'ingresso del RAF dal momento che esso permane per un tempo lungo rispetto alla costante di tempo termica degli interruttori statici. Affinché questa corrente possa effettivamente circolare nella bobina a bordo è necessario che la tensione che essa induce sulla bobina a terra, aumentata della caduta di tensione su R_s , sia minore della massima componente fondamentale della tensione $V_{t,1,M}$ disponibile all'uscita dello IAF, per cui dalla (39) si ottiene la

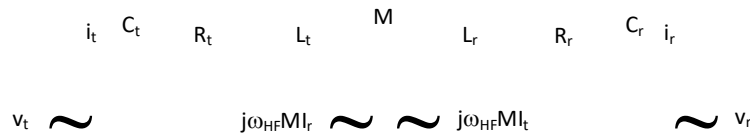


Figura 10. Schema di principio del SWV2H con risonanza serie-serie.

disuguaglianza

$$M \leq \frac{V_{t,1,M} \sqrt{\eta_t}}{H_{F,N} I_{r,N,c}} = 30.0 \mu H \quad (43)$$

La (43) impone un limite massimo alla mutua induttanza tra le bobine, calcolato considerando che nel caso peggiore la pulsazione di alimentazione della bobina a terra può essere aumentata fino a $\omega_{HF,M} = 2\pi \cdot f_{HF,M}$ per correggere le tolleranze di costruzione delle bobine e dei condensatori e portarli in risonanza.

Quando il flusso di energia viene invertito le funzioni dello IAF e del RAF si scambiano e quindi è necessario analizzare nuovamente il funzionamento del SWV2H per determinare se la (43) sia ancora valida per definire i limiti di progetto di M.

Supponendo di iniettare in rete la potenza nominale e tenendo conto della efficienza del CCC e del RAF, la potenza trasferita all'uscita dello IAF è $P_{IAF,N,s}$ per cui la corrente i_t ha ampiezza nominale

$$I_{t,N,s} = \frac{2P_{IAF,N,s}}{V_{t,1,M}} = 12.0 \text{ A} \quad (44)$$

La tensione indotta da i_t sulla bobina a bordo sommata alla caduta di tensione su R_r deve essere minore della massima tensione di prima armonica $V_{r,1,M}$ disponibile all'ingresso del RAF, data dalla (40), per cui deve essere verificata la relazione

$$M \leq \frac{V_{r,1,M} \sqrt{\eta_t}}{H_{F,M} I_{t,N,s}} = 25.4 \mu H \quad (45)$$

Quest'ultima condizione è più stringente di quella posta dalla (43) e pertanto è quella da considerare nel progetto della mutua induttanza. Essa viene pertanto fissata a

$$M = 22.5 \mu H \quad (46)$$

Noto il valore di M è possibile completare la determinazione delle correnti che scorrono nelle bobine nelle modalità di carica e scarica della batteria a potenza nominale e da queste dimensionare anche gli interruttori statici che costituiscono lo IAF e il RAF. La condizione peggiore si ha quando la frequenza di alimentazione delle bobine è minima poiché sono necessarie correnti maggiori per indurre nelle bobine le tensioni richieste per il trasferimento di una data potenza.

Considerando la carica della batteria e indicando con $\omega_{HF,m} = 2\pi \cdot f_{HF,m}$ la pulsazione di alimentazione minima, dalle (39), (42) e (46) si ottiene che la tensione indotta ai terminali della bobina a terra è

$$V_{t,1,m,c} = \frac{H_{F,m} M I_{r,N,c}}{\sqrt{\eta_t}} = 410 \text{ V} \quad (47)$$

per cui, per trasferire la potenza $P_{IAF,N,c}$ la corrente erogata dallo IAF deve essere

$$I_{t,N,c} = \frac{2P_{IAF,N,c}}{V_{t,1,m,c}} = 15.5 \text{ A} \quad (48)$$

Similmente si ottiene che nella modalità di scarica la tensione indotta ai terminali della bobina a bordo è

$$V_{r,1,m,s} = \frac{H_{F,m} M I_{t,N,s}}{\sqrt{\eta_t}} = 139 \text{ V} \quad (49)$$

per cui, per trasferire la potenza $P_{RAF,N,s}$ la corrente erogata dal RAF deve essere

$$I_{r,N,s} = \frac{2P_{RAF,N,s}}{V_{r,1,m}} = 53.5 \text{ A} \quad (50)$$

Dal confronto tra la (44) e la (48) e tra la (42) e la (50) si ricava che la bobina a terra, il suo condensatore di risonanza e gli interruttori statici dello IAF devono essere dimensionati per la corrente $I_{t,N,s}$ mentre la bobina a bordo, il relativo condensatore risonante e gli interruttori statici del RAF devono essere dimensionati per la corrente $I_{r,N,s}$.

Considerando per il coefficiente di accoppiamento k tra le bobine un valore di 0.102, intermedio tra il massimo e il minimo previsto dalla RP J2954 e ipotizzando di adottare la medesima geometria per la bobina a terra e quella a bordo, la induttanza di ciascuna bobina risulta

$$L_r = L_t = \frac{M}{k} = 220 \mu H \quad (51)$$

I condensatori di risonanza, dimensionati considerando la pulsazione di alimentazione nominale, hanno capacità

$$C_r = \frac{1}{\omega_{HF,N}^2 L_r} = 15.9 \text{ nF} \quad C_t = \frac{1}{\omega_{HF,N}^2 L_t} = 15.9 \text{ nF} \quad (52)$$

Ognuna delle bobine è sottoposta ad una tensione complessiva data dalla somma della caduta di tensione dovuta alla propria impedenza e alla tensione indotta dall'altra bobina; adottando la risonanza serie i due

Tabella 6. Valori di dimensionamento per i componenti di potenza del SWV2H.

		Tensione	Corrente	Valore
Raddrizzatore attivo	Induttore L_i	820 V	22.6 A	20 mH
	Interruttori statici	462 V	22.6 A	-
Invertitore ad alta frequenza	Condensatore C_{IAF}	462 V	22.6 A	1.21 mF
	Interruttori statici	462 V	15.5 A	-
Raddrizzatore ad alta frequenza	Condensatore C_{CCC}	139 V	53.5 A	540 μ F
	Interruttori statici	130 V	53.5 A	-
Convertitore cc/cc	Induttore L_o	120 V	50 A	259 μ H
	Interruttori statici	130 V	50 A	-

contributi risultano sfasati di 90 gradi. Considerando ad esempio la bobina a terra, la tensione complessiva ai suoi capi ha espressione

$$V_{Lt} = \sqrt{(\omega_{HF} L_t I_t)^2 + (\omega_{HF} M I_r)^2} \quad (53)$$

Nella modalità di carica, in condizioni nominali, V_{Lt} raggiunge il valore

$$\text{di } V_{Lt,N} = 1.66 \text{ kV} \quad (54)$$

La tensione ai capi di L_r ha una espressione simile alla (53) e raggiunge il suo valore nominale, dato dalla (55), quando il SWV2H opera nella modalità di scarica della batteria.

$$V_{Lr,N} = 5.54 \text{ kV} \quad (55)$$

Le tensioni ai capi dei condensatori corrispondono alle cadute di tensione sulla impedenza delle bobine. Il valore nominale della tensione ai capi di C_t si raggiunge durante la carica della batteria mentre la tensione nominale ai capi di C_r si ha durante la scarica. Essi sono dati rispettivamente dalle

$$V_{Ct,M} = 1.60 \text{ kV} \quad (56)$$

$$V_{Cr,M} = 5.54 \text{ kV} \quad (57)$$

I valori di dimensionamento delle bobine di accoppiamento e delle reti di compensazione sono riassunti nella Tabella 5 mentre i valori di dimensionamento dei principali componenti del SWV2H sono riportati nella Tabella 6

5 Modalità operative

5.1 Gestione delle modalità di carica e di scarica della batteria

In un SWV2H commerciale i processi di carica e di scarica della batteria, con il conseguente rilascio di potenza elettrica in rete, dovrebbero avvenire seguendo le indicazioni del proprietario del veicolo e massimizzando il ritorno economico derivante dall'impiego di un sistema bidirezionale. Così, ad esempio, la scarica e la carica dovrebbero essere gestite in modo che la batteria venga scaricata quando il prezzo dell'energia risulta massimo e che essa risulti carica all'ora in cui il proprietario prevede di utilizzare il veicolo. Il progetto qui considerato è incentrato soprattutto sulla generazione e la gestione di flussi di

Tabella 5. Valori di dimensionamento per le bobine di accoppiamento e le reti di compensazione.

	Tensione	Corrente	Valore
Bobina a terra	1.66 kV	15.5 A	220 μ H
Bobina a bordo	5.54 kV	53.5 A	220 μ H
Mutua induttanza	-	-	22.5 μ H
Condensatore di risonanza C_t	1.60 kV	15.5 A	15.9 nF
Condensatore di risonanza C_r	5.54 kV	53.5 A	15.9 nF

energia bidirezionali in un sistema wireless per cui la gestione ad alto livello della scarica e della carica della batteria descritta sopra esula dai suoi scopi. Si prevede quindi che nel corso delle prove sperimentali il SWV2H operi effettuando in sequenza cicli di carica e di scarica della batteria, facendo variare alternativamente il suo stato di carica tra il massimo e il minimo. Questo approccio consente di verificare il funzionamento del SWV2H in ogni possibile condizione operativa senza la necessità di sviluppare complesse procedure di gestione che, tra l'altro, avrebbero anche necessità di interfacciarsi con un server di dati esterno per conoscere il prezzo dell'energia.

La sequenza delle operazioni da svolgere nelle modalità di carica e di scarica e le condizioni che ne abilitano o disabilitano l'esecuzione sono rappresentate mediante il diagramma di flusso di Figura 11. Il diagramma si presenta come un anello chiuso perché la sequenza delle operazioni dipende dallo stato della rete e della batteria ed è quindi necessario verificarli periodicamente per adattare il comportamento del SWV2H alla loro evoluzione temporale. Per conoscere le condizioni della rete e della batteria è necessario che il SWV2H sia dotato delle soluzioni hardware e software atte ad acquisire la frequenza e l'ampiezza della tensione di rete e lo stato di carica della batteria. Nel tracciare il diagramma i Figura 11 e i successivi si è pertanto supposto che queste grandezze siano note; nei diagrammi le grandezze misurate sono indicate con i caratteri italici. Per l'implementazione degli algoritmi di controllo effettivi sarà necessario acquisire anche altre grandezze, quali la corrente di rete e la corrente di batteria, tuttavia esse non compaiono nei diagrammi di flusso riportati più avanti poiché essi riportano solamente le operazioni da svolgere, senza entrare nel dettaglio della loro esecuzione.

Le funzioni svolte dai blocchi "Carica la batteria" e "Scarica la batteria" saranno descritte più approfonditamente nei capitoli 5.2 e 5.3. I due blocchi calcolano il riferimento per la potenza attiva e reattiva scambiata con la rete e li inviano al blocco "Calcola il riferimento per la corrente di rete" che li elabora insieme alla misura della tensione di rete per ottenere il riferimento della corrente da assorbire dalla rete. Quest'ultimo viene inviato all'ultimo blocco del diagramma di flusso che ha il compito di implementare il controllo di corrente. Per facilitare la lettura del diagramma sono state introdotte alcune semplificazioni; ad esempio, non è stato esplicitato il fatto che la corrente deve essere sincronizzata con la tensione di rete per mantenere la richiesta relazione di fase.

La modalità di carica e quella di scarica della batteria sono abilitate rispettivamente quando viene raggiunto lo stato di carica minimo o massimo; queste condizioni sono segnalate dal Battery Management System (BMS), se disponibile, oppure sono riconosciute misurando la tensione della batteria e la corrente di carica. Entrambe le possibilità sono rappresentate mediante il blocco "Determina lo *Stato di Carica* della batteria".

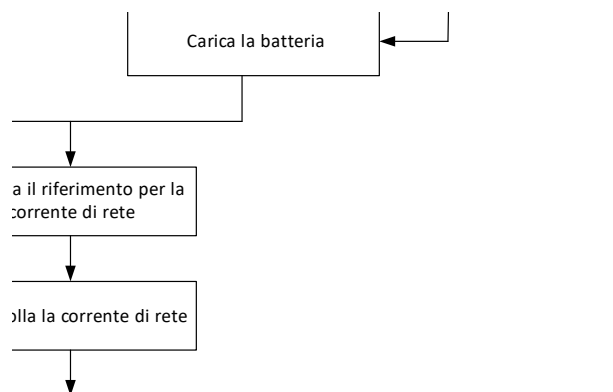


Figura 11. Diagramma di flusso per la gestione della carica e della scarica della batteria.

Nella progettazione dettagliata del sistema di controllo saranno tenute in debita considerazione anche le complicazioni derivanti dal fatto che, ad esempio, sarà necessario regolare la tensione dei due bus in continua presenti nel SWV2H, mantenere la corrente nelle bobine di accoppiamento entro i limiti di progetto, sincronizzare le operazioni della sezione a terra del SWV2H con quello della sezione a bordo del veicolo. Si prevede quindi che il sistema di controllo complessivo sarà costituito da più anelli di controllo innestati uno nell'altro oppure interagenti tra loro e che saranno impiegate anche altre variabili di controllo oltre alla corrente di rete.

5.2 Modalità di carica della batteria

Quando il SWV2H opera nella modalità di carica della batteria è attivato il blocco “Carica la batteria” e il SWV2H appare alla rete domestica come un carico tradizionale, per cui le specifiche imposte dalla norma CEI 0-21 sono relativamente poco stringenti. È sufficiente infatti che il RA, che in questa modalità opera come raddrizzatore, assorba da rete una corrente sinusoidale, con ampiezza non superiore a $I_{i,N}$ e con il corrispondente assorbimento di una potenza attiva non superiore a $P_{i,N}$. Questi limiti, considerando la tensione di rete nominale $V_{i,N}$, richiedono che il SWV2H operi con un $\cos\phi$ non inferiore a 0.9. Data la possibilità di controllare la fase della corrente assorbita dal RA, è conveniente mantenere il $\cos\phi=1$, in

modo da ridurre la corrente assorbita a parità di potenza, con una conseguente riduzione delle sollecitazioni e delle perdite sui componenti del RA. Il riferimento di potenza reattiva fornito dal blocco “Carica la batteria” sarà quindi sempre nullo mentre il riferimento per la potenza attiva sarà limitato a $P_{i,N}$. Come è stato mostrato nel capitolo 3, durante la prima fase di carica della batteria, che teoricamente avviene a corrente costante, non è mai possibile raggiungere la massima corrente di carica ammessa dalla batteria a causa della limitazione della potenza attiva resa disponibile dalla rete domestica. Di conseguenza, supponendo di effettuare la carica della batteria a partire dalla sua condizione di fine scarica, nella prima fase della carica il SWV2H opera iniettando nella batteria tutta la potenza disponibile $P_{i,N}$. In queste condizioni non viene effettuato un vero e proprio controllo della corrente iniettata nella batteria dato che il SWV2H opera limitando la potenza in ingresso del RA piuttosto che la corrente di carica. Tuttavia la tensione ai capi della batteria viene costantemente monitorata e, non appena essa raggiunge il valore di fine carica, il blocco “Carica la batteria” inizia a mantenere costante la tensione ai suoi capi mediante il blocco “Regola la tensione di batteria” che genera un riferimento per la corrente di carica che scende lentamente man mano che lo stato di carica della batteria aumenta. Il blocco “Calcola il riferimento per P_i ” ottiene il riferimento per la potenza da assorbire da rete elaborando il riferimento per la corrente di carica e la tensione della batteria. All’inizio della fase di carica a tensione costante il riferimento per P_i sarà maggiore di $P_{i,N}$ per cui l’uscita del blocco “Calcola il riferimento per P_i ” deve essere dotata di un limitatore. Se la batteria è dotata di BMS, il blocco “Calcola il riferimento per P_i ” riceve direttamente da quest’ultimo il riferimento per la corrente di carica della batteria. Anche in questo caso, a causa della limitata potenza disponibile, tale riferimento non può essere raggiunto durante la prima fase di carica tensione costante. La sequenza delle operazioni svolte nella modalità di carica della batteria può essere esemplificata nel diagramma di flusso di Figura 12, disegnato ipotizzando che il BMS non sia presente e che quindi sia il blocco “Regola la tensione di batteria” a fornire il riferimento per la corrente di carica.

5.3 Modalità di scarica della batteria

La Figura 13 riporta una rappresentazione schematica del diagramma di flusso relativo alla modalità di

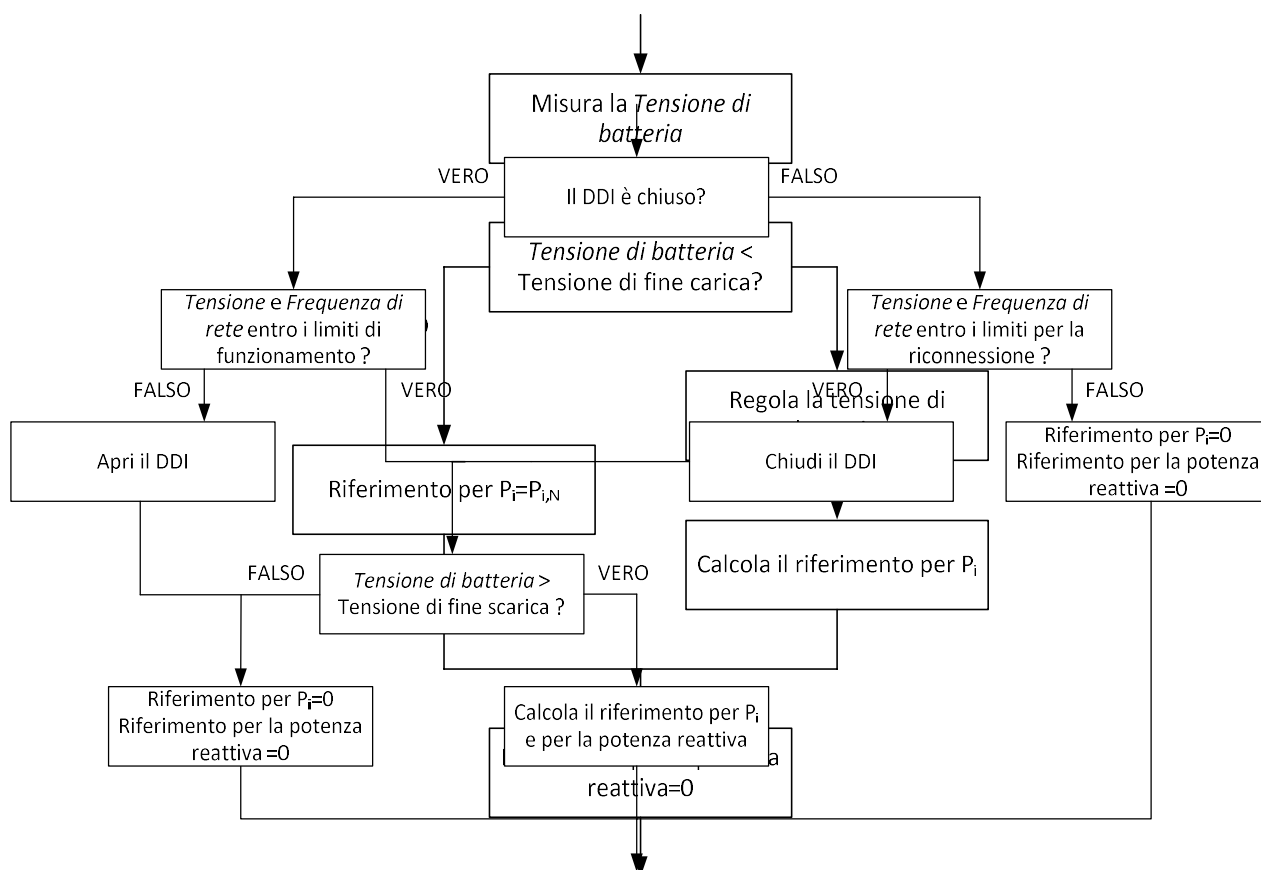


Figura 13: Diagramma di flusso della modalità di carica della batteria.

scarica della batteria. In questa modalità il RA opera come invertitore e inietta in rete una corrente idealmente sinusoidale; anche in questo caso l'ampiezza della corrente e l'ammontare della potenza attiva scambiata con la rete non devono superare i rispettivi valori massimi pari a $I_{i,N}$ e $P_{i,N}$. Tuttavia, a differenza di quanto esposto nel capitolo precedente, il SWV2H non opera sempre con $\cos\phi$ unitario dato che, come visto nel capitolo 2.1, esso inietta in rete anche potenza reattiva il cui ammontare dipende dal valore attuale di P_i e dalle condizioni della rete stessa.

Per quanto riguarda la batteria, esistono due vincoli da rispettare. Il primo consiste nell'evitare di portare il suo livello di carica al di sotto del minimo, il secondo richiede di limitare la corrente di scarica al valore di dimensionamento $I_{0,N,S}$, in accordo con quanto riportato nel capitolo 3. La prima funzione viene svolta dal blocco "*Tensione di batteria > Tensione di fine scarica?*" che stabilisce se continuare a estrarre potenza dalla batteria oppure se interrompere la scarica. Il blocco "*Calcola il riferimento per P_i e per la potenza reattiva*" calcola i riferimenti per la potenza attiva e reattiva da scambiare con la rete. Nel calcolo effettua innanzitutto una limitazione della corrente di scarica della batteria riducendo eventualmente il valore di riferimento per P_i rispetto a $P_{i,N}$; successivamente applica le leggi di controllo locali per ridurre ulteriormente il riferimento per P_i , se ciò fosse necessario per adattarlo alle condizioni attuali della rete, e per determinare il riferimento per la potenza reattiva, fissando così il $\cos\phi$. Per non complicare eccessivamente il diagramma non è stata rappresentata la generazione dei profili a rampa della potenza iniettata in rete all'inizio della erogazione e nella fase di recupero da una condizione di guasto della rete stessa; anche questa funzione viene svolta dal blocco "*Calcola il riferimento per P_i e per la potenza reattiva*". La sequenza dettagliata delle funzioni svolte da questo blocco sarà definita contestualmente allo sviluppo degli algoritmi di controllo.

Nella modalità di scarica è anche necessario gestire le soglie a isteresi che definiscono le condizioni di tensione e frequenza di rete che consentono l'iniezione di potenza in rete o forzano la disconnessione del DDI, di conseguenza il diagramma di flusso relativo a questa modalità batteria risulta notevolmente più complesso di quello mostrato in Figura 12 e relativo alla modalità di carica. I blocchi "*Chiudi il DDI*" e "*Apri il DDI*" si riferiscono alle azioni di connettere l'UDC alla rete domestica o di disconnetterla agendo sul DDI; i due blocchi svolgono quindi la funzione dello SPI e, in accordo con la norma CEI 0-21, sono integrati nel sistema di controllo del RA.

Si prevede che per gestire la maggiore complessità della modalità di scarica della batteria sarà necessario implementare nell'algoritmo di controllo del SWV2H una sorta di macchina a stati. Questa non sarebbe strettamente necessaria quando il SWV2H opera nella modalità di carica dato che la potenza assorbita da rete è una funzione istantanea dello stato di carica della batteria.

6 Conclusioni

Nel corso del Piano Annuale di Realizzazione 2019 del progetto "V2H - Studio, progetto e sperimentazione di un sistema di ricarica wireless con funzionalità Vehicle to Home" è stata definita l'architettura del SWV2H e la topologia dei convertitori statici e delle reti di compensazione che lo compongono. Esse sono schematizzate nella Figura 2.

In base alle specifiche fornite da ENEA e a quelle poste dalle norme vigenti sono stati fissati i limiti operativi del SWV2H, riportati nella Tabella 3, ed è stato eseguito il dimensionamento delle bobine di accoppiamento e delle reti di compensazione. Come risultato intermedio di questa attività sono stati ottenuti anche i parametri di dimensionamento dei principali componenti di potenza, sia attivi che passivi, dei convertitori statici che costituiscono il SWV2H. I valori di dimensionamento delle bobine e delle reti di compensazione sono elencati nella Tabella 5 mentre quelli relativi ai componenti dei convertitori statici sono riportati nella Tabella 6.

Dall'analisi delle funzionalità richieste al SWV2H per interfacciarsi alla rete in ottemperanza alla norma CEI 0-21 sono stati ricavati dei diagrammi di flusso che illustrano la sequenza di operazioni da svolgere per effettuare sia la carica che la scarica della batteria e un diagramma complessivo che indica le condizioni per il passaggio da una modalità di funzionamento all'altra.

I parametri di dimensionamento ottenuti per i diversi componenti del SWV2H non rivelano criticità particolari per la realizzazione del prototipo impiegando l'architettura scelta. Essi saranno tuttavia verificati

nel corso del secondo Piano Annuale di Realizzazione del progetto, quando saranno stati sviluppati modelli numerici del sistema che consentiranno di valutare con maggiore precisione l'ampiezza di tensioni e correnti. I diagrammi di flusso riportati nel capitolo precedente costituiranno la base su cui sviluppare l'algoritmo di controllo del sistema complessivo.

7 Riferimenti bibliografici

- [1] D. Patil, M.K. McDonough, J.M. Miller, B. Fahimi e P.T. Balsara, "Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, n. 1, pp. 3-37, 2018.
- [2] J. Lukic e Z. Pantic, "Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles," IEEE Electrification Magazine, vol. 1, n. 1, pp. 57-64, 2013.
- [3] K. Tachikawa, M. Kesler e O. Atasoy, "Feasibility Study of Bi-directional Wireless Charging for Vehicle-to-Grid", SAE Technical Paper 2018-01-0669, pp. 1-9, 2018.
- [4] Z.H. Shi, Z.C. Qiu, X.Y. Chen, e M.Y. Li, "Modeling and Experimental Verification of Bidirectional Wireless Power Transfer", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, n. 2, pp. 0601705, 2019.
- [5] G. Buja, M. Bertoluzzo e K.N. Mude, "Design and Experimentation of WPT Charger for Electric City Car", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, n. 12, pp. 7436-7447, 2015.
- [6] M. Bertoluzzo, R. Jha e G. Buja, "Power Transfer Profile Boosting in DWC Systems by Two-Element Compensation Network", Atti di IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power, pp. 1-6, 2019.
- [7] J.L. Villa, J. Sallan, J.F.S. Osorio e A. Llombart, "High misalignment tolerant compensation topology for ICPT systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, n. 2, pp. 945-951, 2012.
- [8] A.A.S. Mohamed, A. Berzoy, F.G.N. de Almeida e O. Mohammed, "Modeling and Assessment Analysis of Various Compensation Topologies in Bidirectional IWPT System for EV Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, n. 5, pp. 4973-4984, 2017.
- [9] S. Weerasinghe, U.K. Madawala e D.J. Thrimawithana, "A Matrix Converter-Based Bidirectional Contactless Grid Interface" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, n. 3, pp. 1755-1766, 2017.
- [10] G. Buja, M. Bertoluzzo e C. Fontana, "Reactive power compensation capabilities of V2G-enabled electric vehicles", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, n. 12, pp. 9447-9459, 2017.
- [11] G. Buja e M. Bertoluzzo, "Studio e progetto preliminare per un sistema di ricarica dinamica wireless", Report RdS/PAR2015/209, Disponibile: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/mobilita-elettrica/rds_par2015-209.pdf. Ultimo accesso: 07/02/2020.
- [12] M. Bertoluzzo, "Studio e progetto preliminare per un sistema di ricarica dinamica wireless", Report RdS/PAR2016/237, Disponibile: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/mobilita-elettrica/rds_par2016_237.pdf. Ultimo accesso: 07/02/2020.
- [13] *Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica*, CEI 0-21, CEI, 2019. Disponibile: <https://www.ceinorme.it/it/norme-cei-0-16-e-0-21.html>. Ultimo accesso: 07/02/2020;
- [14] *Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology*, J2954, SAE International, 2019.
- [15] M. Bertoluzzo, R. K. Jha, and G. Buja, "Series-series resonant IPT system analysis under frequency mismatch," Atti di IECON 2015, pp. 439 - 444, 2015.

8 Abbreviazioni ed acronimi

BMS	Battery Management System
CCC	Convertitore cc/cc
C_{IAF}	Capacità del condensatore posto tra il raddrizzatore attivo e l'invertitore ad alta frequenza
C_r	Capacità del condensatore di risonanza a bordo
C_t	Capacità del condensatore di risonanza a terra
δ	Duty cycle del convertitore cc/cc
DG	Dispositivo generale
DDI	Dispositivo di interfaccia
ΔI_o	Variazione picco-picco della corrente all'uscita del convertitore cc/cc
ΔV_{IAF}	Variazione picco-picco della tensione ai capi del condensatore posto tra il RA e il IAF
η_c	Efficienza di un convertitore statico
η_t	Efficienza di trasferimento di potenza tra le due bobine
η_{tot}	Efficienza totale del sistema wireless per vehicle to home
f_i	Frequenza della tensione all'ingresso del raddrizzatore attivo
f_{HF}	Frequenza di alimentazione delle bobine
I_i	Corrente all'ingresso del raddrizzatore attivo
I_o	Corrente all'uscita del convertitore cc/cc
I_r	Corrente all'ingresso del raddrizzatore ad alta frequenza, corrente nella bobina a bordo
I_t	Corrente all'uscita dell'invertitore ad alta frequenza, corrente nella bobina a terra
IAF	Invertitore ad alta frequenza
L_i	Induttanza dell'induttore posto all'ingresso del raddrizzatore attivo
L_o	Induttanza dell'induttore di filtro/disaccoppiamento posto all'uscita del convertitore cc/cc
L_r	Induttanza della bobina a bordo
L_t	Induttanza della bobina a terra
M	Mutua induttanza tra le bobine
P_i	Potenza all'ingresso del raddrizzatore attivo
P_{IAF}	Potenza all'uscita dell'invertitore ad alta frequenza
P_o	Potenza all'uscita del convertitore cc/cc
P_{RAF}	Potenza all'ingresso del raddrizzatore ad alta frequenza
RA	Raddrizzatore attivo
RAF	Raddrizzatore ad alta frequenza
$R_{L,eq}$	Resistenza equivalente vista all'ingresso del raddrizzatore ad alta frequenza
SPI	Sistema di protezione di interfaccia
SWV2H	Sistema wireless per vehicle to home
UDC	Utenza domestica complessiva
V_B	Tensione ai capi della batteria
V_{CCC}	Tensione ai capi del condensatore posto tra il raddrizzatore ad alta frequenza e il convertitore cc/cc
V_{Cr}	Tensione ai capi del condensatore di risonanza a bordo
V_{Cr}	Tensione ai capi del condensatore di risonanza a terra
V_i	Tensione all'ingresso del sistema wireless per vehicle to home
V_{IAF}	Tensione ai capi del condensatore posto tra il raddrizzatore attivo e l'invertitore ad alta frequenza
V_{Lr}	Tensione ai capi della bobina a bordo
V_{Lr}	Tensione ai capi della bobina a terra
V_o	Tensione all'uscita del convertitore cc/cc
V_r	Tensione all'ingresso del raddrizzatore ad alta frequenza. Tensione indotta sulla bobina a bordo (nel caso di risonanza serie coincidono)

V_{RA}	Tensione all'ingresso del raddrizzatore attivo
V_t	Tensione all'uscita dell'invertitore ad alta frequenza. Tensione indotta sulla bobina a terra (nel caso di risonanza serie coincidono)
ω_i	Pulsazione della tensione all'ingresso del raddrizzatore attivo
ω_{HF}	Pulsazione della tensione di alimentazione delle bobine

8.1 Pedici

1	Componente fondamentale
c	Carica
m	Minimo
M	Massimo
N	Nominale
s	Scarica

9 Appendice

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 "Sistemi Elettrici per l'Automazione" 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.

10 Ringraziamenti

Si ringrazia il Prof. Giuseppe Buja per le indicazioni e i suggerimenti forniti durante lo svolgimento della ricerca e per il contributo alla stesura della relazione