

ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero della Transizione Ecologica



Ricerca di Sistema elettrico

WV2H: dati sperimentali e analisi SWOT

Antonino Genovese, Rosanna Pinto,
Lucia Ardoino, Alessandro Zambotti,

Report RdS/PTR2021/198

WV2H: DATI SPERIMENTALI E ANALISI SWOT

Antonino Genovese, Rosanna Pinto, Lucia Ardoino, Alessandro Zambotti
(ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – III annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Mobilità

Linea di attività: LA 2.12 - Collaudo e valutazione economica del SWV2H - Valutazione dell'esposizione ai CEM emessi in scenari espositivi realistici

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 VERIFICA SPERIMENTALE CARATTERISTICHE BOBINE ACCOPPIAMENTO.....	7
2.1 MISURA DI IMPEDENZA DELLE BOBINE.....	8
3 IL SISTEMA WV2H IMPLEMENTATO.....	11
4 ANALISI SWOT.....	15
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	19

Sommario

Il report riporta i risultati dei test eseguiti in laboratorio durante la fase di realizzazione del prototipo del sistema Wireless per l'applicazione V2H. In primo luogo viene descritta la rilevazione delle caratteristiche elettriche delle spire realizzate secondo le determinazioni progettuali e con le specifiche tecniche derivanti dalla fase di progettazione assistita al computer. Questa fase è stata poi utilizzata in fase esecutiva per determinare compiutamente i valori delle capacità di risonanza per gli stadi primario e secondario. Infine si è valutato il valore del coefficiente di accoppiamento e della mutua induttanza.

In sequenza sono riportati i primi valori sperimentali risultanti dei test sul sistema realizzato con prove eseguite al banco.

Infine si riporta una indagine sulle potenzialità del sistema e sui punti di forza evidenziane le potenzialità di sviluppo della tecnologia.

1 Introduzione

A valle della fase di analisi del problema, della progettazione di sistema e degli algoritmi di regolazione si è proceduto con la realizzazione fisica del sistema di ricarica wireless bidirezionale al fine di poter asservire il sistema di accumulo del veicolo alle esigenze energetiche di una abitazione.

La realizzazione del sistema è stata condotta da una ditta specializzata e con la collaborazione costante dei soggetti impegnati nella attività di ricerca: ENEA e Università di Padova.

ENEA ha provveduto a far realizzare le due spire induttive necessarie a garantire l'accoppiamento fornendo le specifiche progettuali scaturite dalle simulazioni effettuate nella precedente annualità. A consegna dei manufatti si è reso necessaria un'azione di verifica della corrispondenza delle spire alle richieste progettuali.

Di seguito le spire, inviate presso il realizzatore dei sistemi TX e RX, sono state utilizzate per le operazioni di messa a punto. Infine si sono eseguite le prime misure per verificarne le caratteristiche di trasferimento di energia bidirezionale.

Infine una valutazione sintetica è stata operata per individuare i punti di favore e contro dei sistemi di tale specie per l'applicazione di scambio veicolo-abitazione.

2 Verifica sperimentale caratteristiche bobine accoppiamento

Il sistema di ricarica bidirezionale wireless prevede che il trasferimento di energia tra la rete elettrica ed il sistema di accumulo sia effettuato per tramite di un accoppiamento magnetico realizzato con due spire mutuamente accoppiate. In fase di progetto sono state definite le grandezze di progetto per i valori di mutua induttanza e dell'induttanza delle bobine primaria e secondaria [1]. Come evidenziato dalla Tabella 1 le due bobine dovrebbero essere realizzate per ottenere un valore di induttanza mutua di 22.5 μH ed una induttanza di 220 μH .

Stante la SAE J2954 [2] la classe del Wireless Transfer Power System (WTPS) è la WPT1 con 3.7 kVA di potenza apparente massima richiesta. Nella Tabella 2 le richieste minime prevedono una efficienza minima in condizioni di massimo allineamento di 0.85 mentre in condizioni di offset viene indicato un valore superiore a 0.8.

Tabella 1: parametri di progetto delle bobine

	Tensione	Corrente	Valore
Bobina a terra	1.66 kV	15.5 A	220 μH
Bobina a bordo	5.54 kV	53.5 A	220 μH
Mutua induttanza	-	-	22.5 μH
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

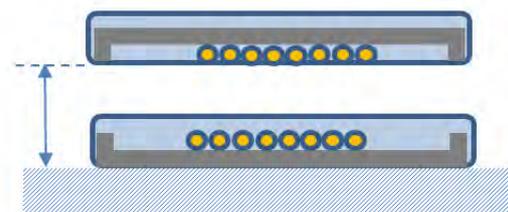
Tabella 2: requisiti WPT1 minimi richiesti

	WPT1
Maximum input VA	3.7 kVA
Minimum target efficiency at nominal X,y alignment	>85%
Minimum target efficiency at offset position	>80%

Il disallineamento massimo per rispettare il valore nominale è ± 7.5 cm per lo spostamento laterale e ± 10 cm per lo spostamento longitudinale. Altro parametro di riferimento nella SAE J2954 è l'altezza da terra della bobina posta sul veicolo che viene suddivisa in tre classi come riportato in Tabella 3.

Tabella 3: classi in funzione della distanza da terra

Z-Class	VA Coil Ground Clearance Range (mm)
Z1	100 to 150
Z2	140 to 210
Z3	170 to 250



Nel caso di interesse del presente lavoro la classe di riferimento è la Z2 compresa tra 14 e 21 cm.

Il coefficiente di accoppiamento k è individuato in 0.102, intermedio tra il massimo e il minimo previsto dalla RP J2954 e pone in relazione L_r o L_t con M :

$$M = k * \sqrt{(L_r * L_t)}$$

Se le bobine sono identiche $M=0.102*220 = 22.5 \mu\text{H}$.

2.1 Misura di impedenza delle bobine

In Figura 1 è mostrato uno schema del sistema di bobine e la definizione della distanza magnetica d tra le bobine.

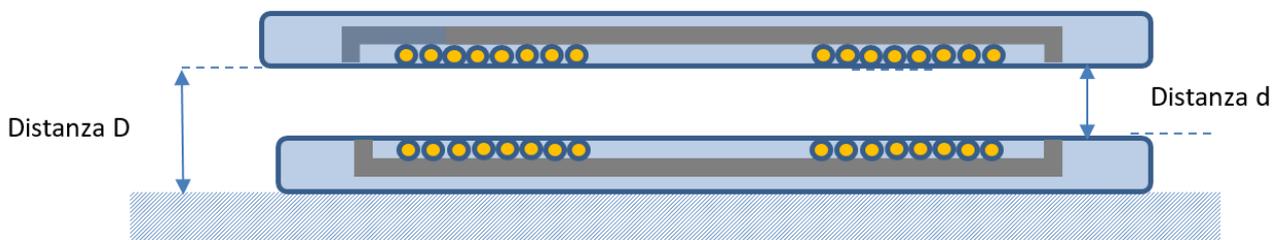
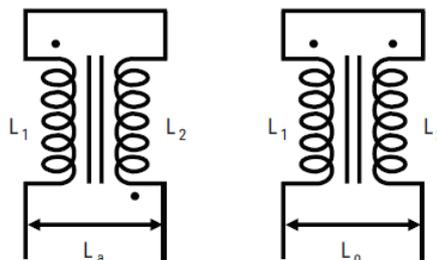


Figura 1: definizione della distanza da terra (D) e della distanza magnetica (d)

Il progetto delle bobine è stato fatto per mezzo del solutore FEM del codice di calcolo commerciale CST Microwave Studio (versione 2021) e le valutazioni di impedenza sono state eseguite per una variazione di d compresa fra 140 mm e 190 mm. I dati di impedenza ottenuti dalle simulazioni e presentati nel report dello trascorsa annualità sono riportati in Tabella 4 per facilitare il confronto.



La bobina è del tipo circolare come riportata in avvolgimenti circolari.

con 14

Tabella 4: Induttanze e Mutue induttanze Resistenze al variare della distanza fra le bobine

R	d	L	M
[Ω]	[mm]	[μH]	[μH]
0.3	140	115	32.8
0.3	150	114	29.4
0.3	160	114	26.4
0.3	170	113	23.8
0.3	180	113	21.5
0.3	190	113	19.5

In grassetto sono evidenziati i valori di mutua induttanza che rispettano le specifiche di progetto [1] imposte in termini di mutua induttanza ($22 \pm 2.2 \mu\text{H}$).

Differentemente dalla indicazione di progetto i valori di induttanza risultano circa la metà di quanto richiesto dalle specifiche. Una valutazione eseguita insieme ai progettisti (Univ. Di Padova) ha evidenziato una minore importanza del rispetto di questo valore poiché la discordanza è recuperabile attraverso la rete di risonanza. Quindi si è optato per questo valore scaturito dalle simulazioni di progettazione.

Successivamente alla realizzazione delle bobine (Figura 2) si è provveduto a verificare sperimentalmente il raggiungimento dei valori di progetto al variare della distanza magnetica d . La metodologia adoperata per la verifica dei parametri del sistema di accoppiamento è descritta in [3].

Per le misure di induttanza, la bobina in esame è connessa all'analizzatore di impedenze vettoriale, le altre vengono lasciate aperte. Le misure di mutua induttanza tra due bobine si eseguono connettendo le due bobine nei due modi illustrati in Figura 3 e misurando le induttanze L_a e L_o .

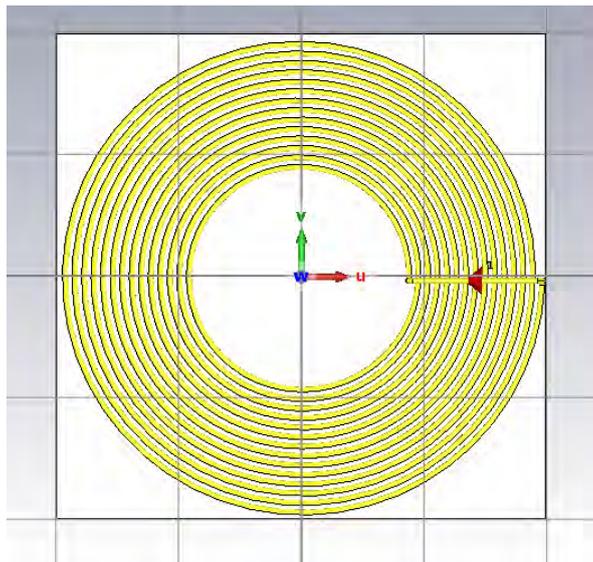


Figura 2: bobina circolare di progetto

Nella prima configurazione

$$L_a = L_r + L_t + 2M$$

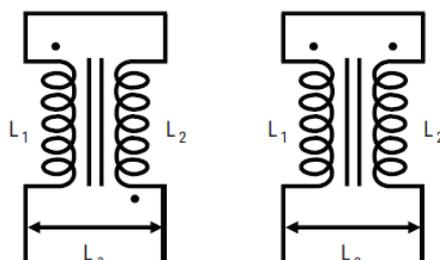


Figura 3: connessione serie per la misura della mutua induttanza (in fase e controfase)

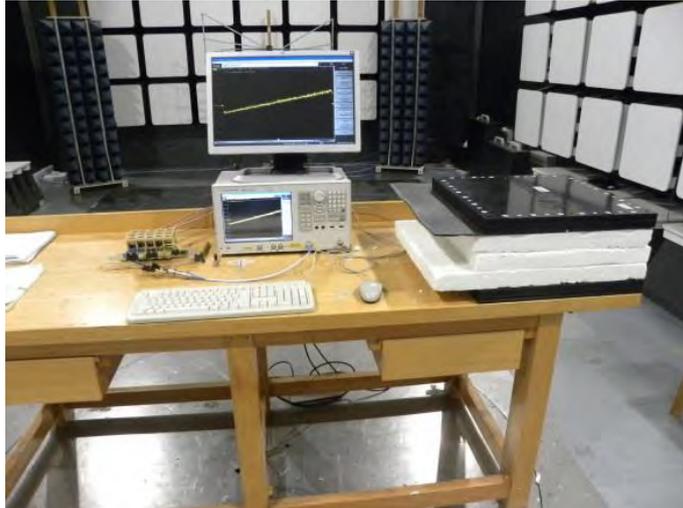


Figura 4: banco di misura per l'impedenza del sistema di bobine

Nella seconda configurazione

$$L_0 = L_r + L_t - 2M$$

Dalla misura di L_a e L_0 , si ottiene il valore della mutua induttanza M con

$$M = \frac{L_a - L_0}{4}$$

Il banco di misura è mostrato in Figura 4: un analizzatore di impedenza vettoriale (Keysight E5061B 5 Hz – 3 GHz) collegato alle bobine tramite un ponte che consente un rapido cambio di configurazione secondo quanto mostrato in Figura 3. L'incertezza della misura di induttanza è pari a $\pm 10\%$, mentre quella della misura di mutua induttanza è pari a $\pm 14,2\%$: in entrambi i casi si è considerato un fattore di copertura $k = 2$ (livello di confidenza pari al 95%).

La distanza d tra le bobine ed il parallelismo è stata mantenuta con dei pannelli di polistirolo ed è stata fatta variare tra 140 mm e 190 mm analogamente a quanto fatto nelle simulazioni.

In Tabella 5 sono mostrati i valori di induttanza delle singole bobine e di mutua induttanza ottenuti sperimentalmente al variare di d .

Come si può vedere dal confronto con i valori di progetto i dati sperimentali (tenuto conto delle incertezze) sono confrontabili con i dati numerici, confermando così la validità del modello numerico e del progetto.

Tabella 5: Induttanze e Mutue induttanze ottenute sperimentalmente al variare della distanza fra le bobine

d [mm]	L1 [μ H]	L2 [μ H]	M [μ H]
140	116	115	29
150	115	115	27
160	115	114	24
170	115	114	22
180	114	114	19

d [mm]	L1 [μ H]	L2 [μ H]	M [μ H]
190	114	114	18

In funzione dei dati sperimentali è possibile tracciare il valore del coefficiente di accoppiamento k al variare della distanza di lavoro delle bobine. La Figura 5 visualizza la differenza tra i valore del k misurato con quello di progetto. Lo scostamento risulta contenuto entro il 10%.

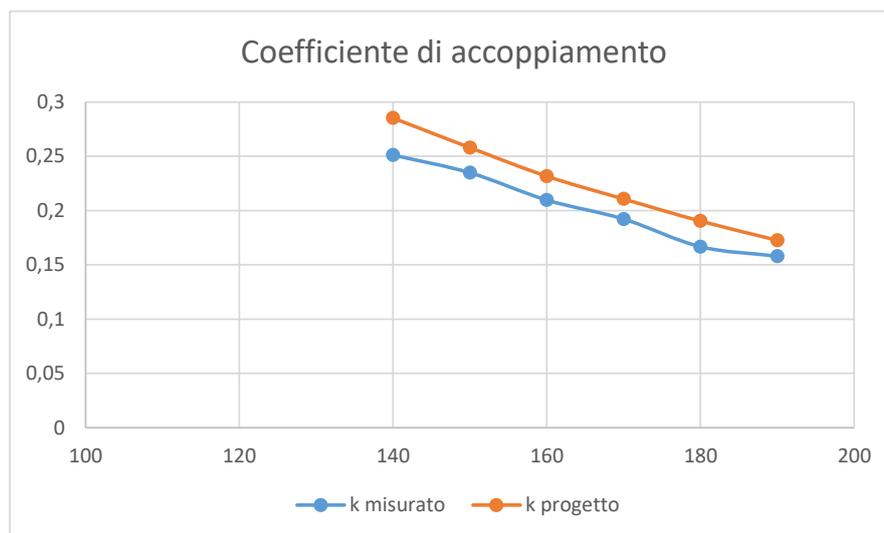


Figura 5: variazione di k in funzione della distanza delle bobine

Quanto risultato dalle misure in laboratorio si mantiene il linea con le indicazioni di progetto mostrando anche un valore dell coefficiente di accoppiamento di buon livello nelle condizioni di distanza tra i 140 e 160 mm.

3 Il sistema WV2H implementato

Definito il progetto del sistema come rappresentato in [1] si è proceduto alla esecuzione realizzativa del progetto attraverso l'affidamento ad un soggetto qualificato in grado di eseguire le progettazioni di dettaglio, la realizzazione dei PCB e l'ingegnerizzazione del sistema.

I tempi ristretti per giungere ad una realizzazione del sistema in oggetto unite alla esigenza di garantire il corretto interfacciamento con la rete elettrica rispettando l'insieme delle condizioni tecniche di sicurezza e di erogazione/prelievo della potenza hanno indirizzato verso la selezione di un dispositivo commerciale, quindi già in possesso dei requisiti tecnici di scambio della potenza con la rete elettrica. In sostanza il raddrizzatore attivo (RA) dello schema progettuale riportato in Figura 6 è un prodotto commerciale con caratteristiche tali da essere fruibile come elemento di collegamento tra la rete elettrica e l'ingresso dell'inverter ad alta frequenza (IAF).

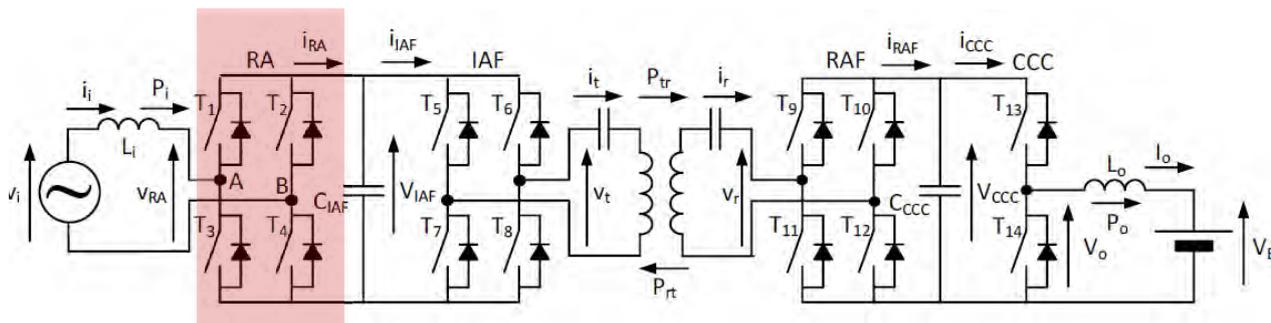


Figura 6: schema a blocchi del sistema WV2H

Per l'applicazione progettuale si è provveduto ad acquisire un sistema bidirezionale da 5 kW per impiego fotovoltaico con sistema di accumulo (modello SolaX X3 Hybrid, Figura 7).

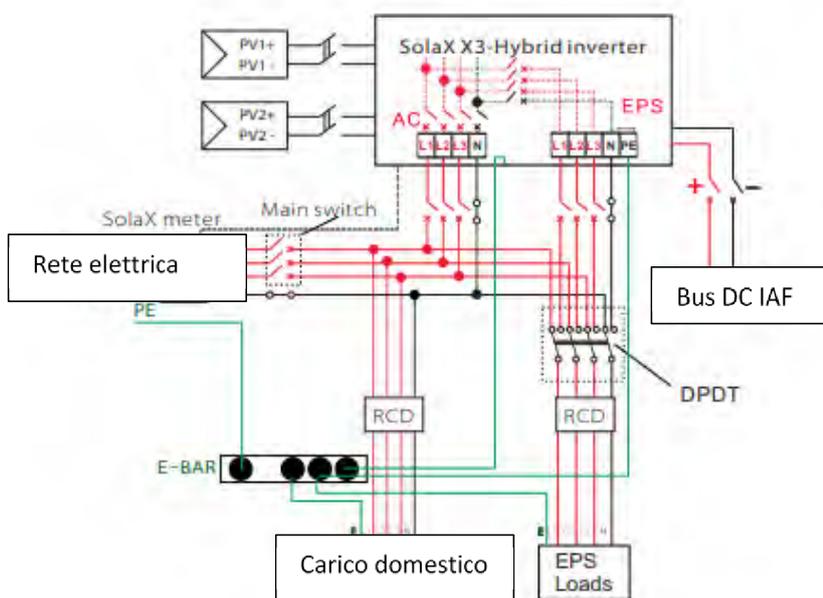


Figura 7: schema di collegamento inverter bidirezionale di interfaccia rete

Le funzioni del RA sono quindi demandate all'inverter commerciale utilizzando l'accesso batterie per il collegamento al bus DC dell'inverte AF con interposta la capacità di buffer del bus. La funzione operativa del RA sarà quella tipica delle ore notturne con alimentazione del carico dalle batterie (condizione self-use senza pannelli). In questo caso il controllo interno dell'inverter di rete ha il compito di mantenere costante il livello di tensione della capacità sul Bus DC dello IAF senza distinguo tra prelievo o cessione di energia.

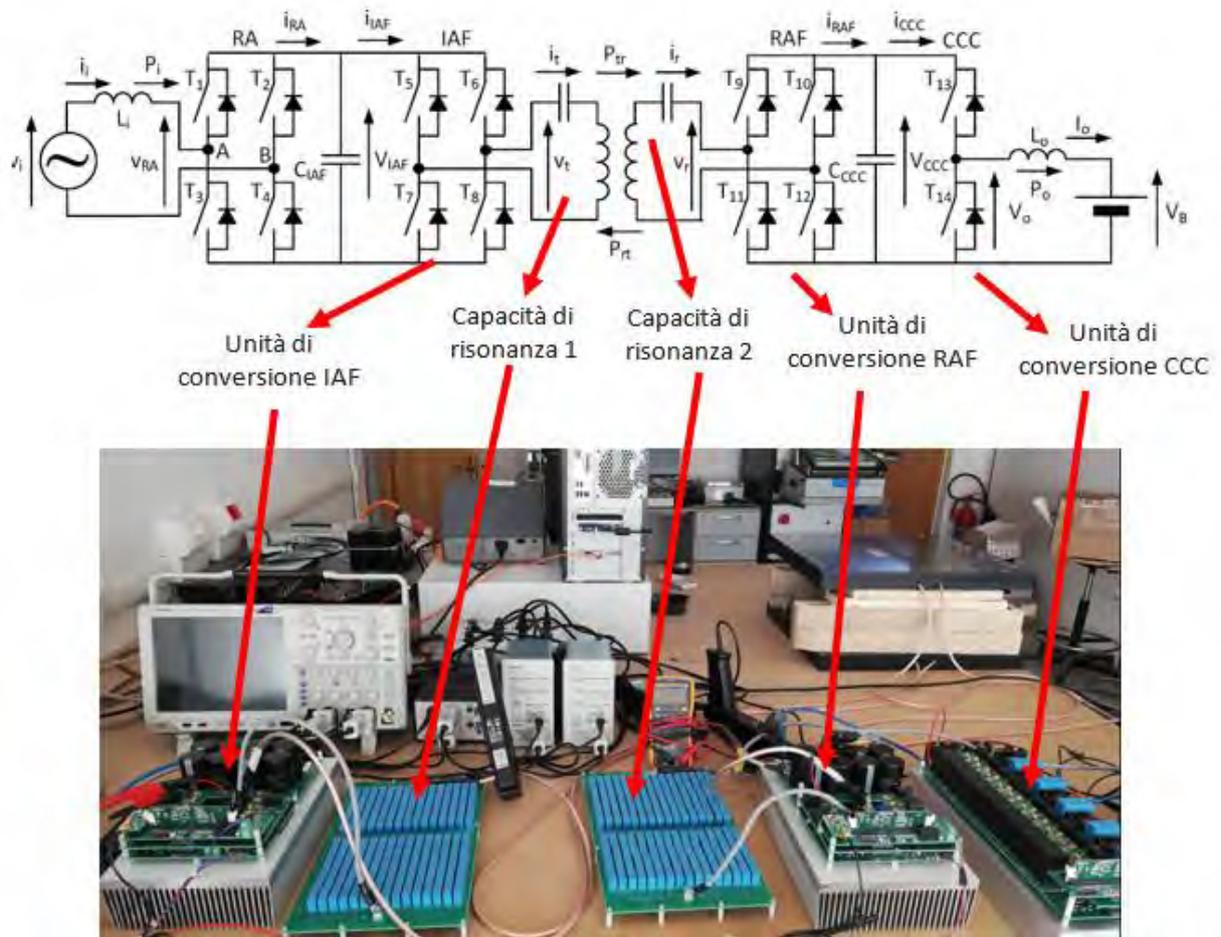


Figura 8: sistema WV2H in prova

La massima efficienza del sistema di accoppiamento può essere espressa dalla seguente relazione come evidenziato in [4]:

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k * \sqrt{Q_p * Q_s}}}$$

In base ai parametri circuitali ricavati dalle misure delle bobine il valore massimo dovrebbe essere di 0.95 alla distanza di 170 mm. Ovviamente a causa delle perdite per effetto ohmico, di quelle magnetiche e di quelle di commutazione nei circuiti di attivi il valore sarà più basso.

Per l'efficienza complessiva il valore richiesto, in accordo con la SAE J2954 deve essere superiore a 0,85.

Le prove di trasmissione di energia alla massima potenza in fase di ricarica hanno segnato un valore di 0.90 quale efficienza complessiva (Figura 9). In questo caso la potenza trasferita è stata di 3 kW.



Figura 9: valori di efficienza di sistema

Il valore ricavato soddisfa le condizioni minime di efficienza richiesta essendo superiore al minimo di 0.85. L'efficienza complessiva di trasferimento prendendo come riferimento il circuito in risonanza può essere calcolata in base alla relazione seguente ripresa da [5]:

$$\eta_t = \frac{R_L}{\frac{(R_1+R_L)^2 * R_1}{k^2 * \omega^2 * L_1 * L_2} + R_L + R_2}$$

Utilizzando i valori $R_1 = R_2 = 0,3 \Omega$ e $R_L = 5 \Omega$ si ottiene $\eta = 0.94$ a cui aggiungere le perdite magnetiche e quindi in buon accordo con il valore rilevato.

In senso inverso ossia dalla batteria verso la casa l'efficienza è simile ossia 0.905 ma il test è stato eseguito ad una potenza minore pari a 2.2 kW.

L'uso di una potenza minore è stato necessario a causa di un problema tecnico insorto durante i test che ha impedito la prosecuzione delle prove: alla massima potenza, le tensioni elevate presenti ai capi delle bobine hanno superato la tensione di isolamento della guaina del filo di Litz con cui sono stati realizzati gli avvolgimenti delle spire induttive, provocando delle scariche elettriche nel punto di sovrapposizione tra il cavo di ingresso e quello di uscita della bobina (Figura 11). Questo evento ha danneggiato la bobina, degradandone le prestazioni, e ha evidenziato che il layout della bobina dovrà essere leggermente modificato per evitare sovrapposizioni non necessarie del filo di Litz.

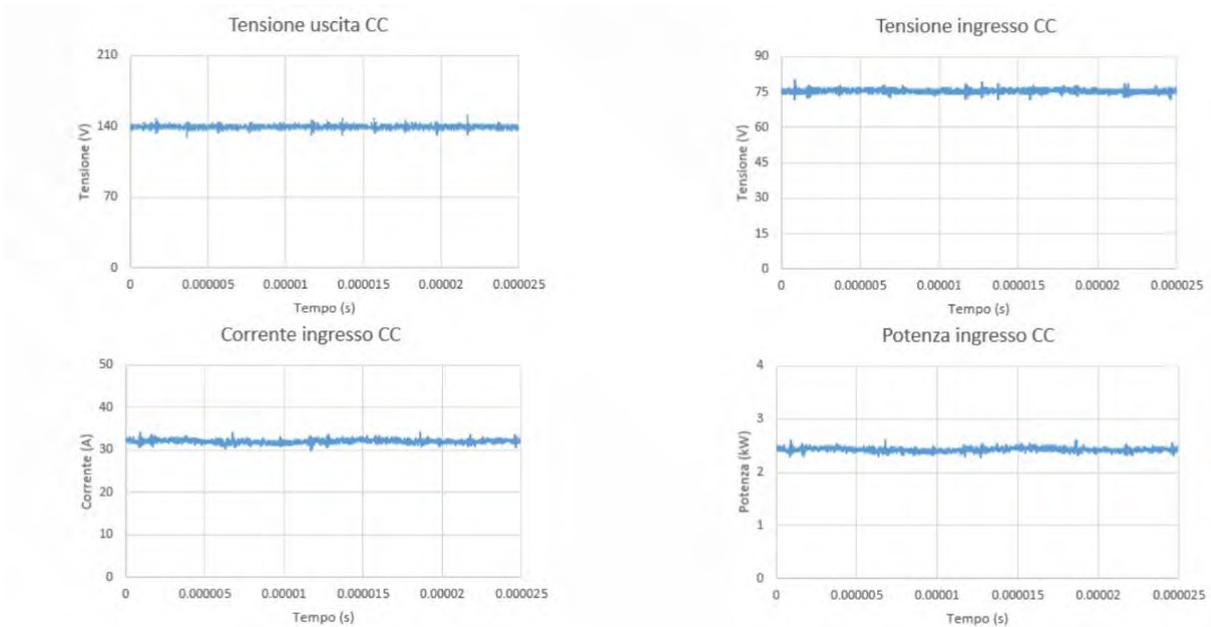


Figura 10: tensione e corrente in uscita

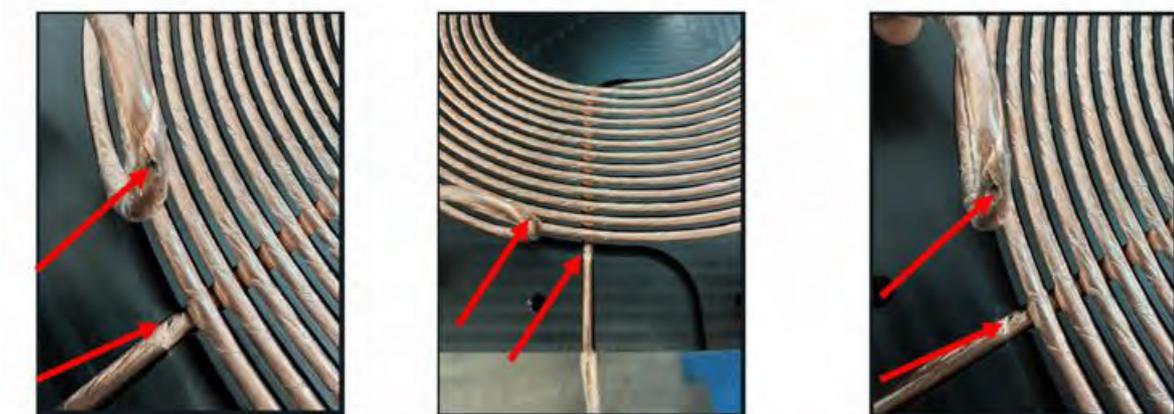


Figura 11: perdita di isolamento nelle spire

4 Analisi SWOT

La conduzione di una analisi pro-contro dell'applicazione WV2H ci offre un quadro sulle possibilità di sviluppo della tecnologia di ricarica veicolare a supporto dei consumi domestici.

Partiamo dalla individuazione dai fattori che rendono attrattiva la tecnologia wireless (punti di forza):

- Semplificazione delle operazioni per porre in ricarica il veicolo escludendo l'esigenza di connessione cablata tra la stazione di ricarica ed il veicolo;
- Sicurezza elettrica di connessione;
- Automazione del servizio di ricarica;
- Interoperabilità tra classi Z

Spesso la soluzione elettrica per la mobilità privata è considerata limitativa nella esigenza di dover ripetere con una certa cadenza (dipendente dalla capacità della batteria del veicolo e dalla esigenza di percorrenza)

le operazioni di ricarica. Questo richiede che il conducente si attivi in modo da operare la connessione spina-presa tra veicolo e punto di ricarica. La ripetitività dell'azione è vista come un fastidio da parte dell'utente e nasconde in sé il rischio di dimenticare/trascurare/sottostimare/rinviare la reale esigenza di provvedere al rifornimento di energia. La possibilità di eseguire una ricarica automaticamente, senza che sia prevista la partecipazione fattiva del driver, procede nella direzione di mantenere un livello minimo di autonomia del mezzo attraverso l'impiego di logiche di apprendimento dei cicli di utilizzo del veicolo e di ricariche frequenti durante le soste.

La tecnologia wireless per la ricarica si offre anche ad una diversa visione delle strutture di ricarica presenti in parcheggi (anche condominiali) o lungo i marciapiedi liberando i limiti perimetrali e stradali da oggetti di ingombro (colonnine) potenzialmente soggetti ad eventi incidentali ed urti. I maggiori spazi in superficie saranno disponibili per la pedonalizzazione e per la mobilità ciclabile.

Eseguire l'inserzione della spina è oggetto di una corposa normativa per rendere sempre più sicura l'operazione di ricarica. Ad esempio la verifica della presenza della spina, la verifica della integrità della linea di ricarica, la verifica delle protezioni sono alcuni dei passi individuati come necessari al consenso di erogazione dell'energia. Altri aspetti per la sicurezza sono legati alla integrità dei componenti quali la spina ed il cavo soggetti ad eventuali danni meccanici per urto, compressione accidentale, trazione, torsione. Non avere punti di connessione diretta tra veicolo e punto di ricarica garantisce una maggiore sicurezza separando fisicamente la rete elettrica dal veicolo grazie alla assenza di connessione elettrica cablata. Come indicato al primo punto, l'automazione del servizio di ricarica diviene fattibile non esigendo l'intervento dell'uomo nelle fasi di connessione. Il riconoscimento del soggetto è conseguibile attraverso le tecnologie digitali e sistemi di comunicazione in radiofrequenza implementanti protocolli di scambio dati necessari alle fasi di riconoscimento, richiesta di scambio, modulazione potenza e fine sessione. La tecnologia di comunicazione wireless diviene essenziale nel processo di controllo delle operazioni e deve risultare ben definito anche il protocollo di scambio (ad esempio secondo una logica master-slave in cui viene richiesto lo stato e la disponibilità ad esercitare la funzione di supporto al carico o la richiesta di carica).

Ultimo aspetto è legato alla interoperabilità tra le classi Z1, Z2, Z3 secondo IEC 61980-3 (SAE J2954).

Dal punto di vista dei fattori con influenza negativa (debolezze) troviamo l'esigenza di mantenere valori minimi di efficienza nel trasferimento di potenza (almeno 85% nel caso di allineamento perfetto e almeno 80% in caso di massimo disallineamento consentito ± 75 mm), e di realizzare circuiti magnetici attraverso il concorso di materiali idonei per lavorare alla frequenza di 85 kHz. Infatti, la frequenza di lavoro e le alte correnti in gioco richiedono il ricorso ai fili di Litz realizzati in rame per la costruzione degli avvolgimenti. Inoltre, si utilizzano ferriti per migliorare il flusso di energia tra le bobine e quindi l'efficienza del

trasferimento e, contemporaneamente, limitare la dispersione del campo magnetico nell'ambiente circostante, queste rappresentano un valore aggiunto nell'insieme dei costi.

L'interramento dei dispositivi primari richiede operazioni di scavo con posa in opera di cavi di collegamento all'abitazione e/o all'edificio condominiale. L'esecuzione delle tracce e del sito di alloggio della bobina primaria e relativa elettronica deve essere successivamente ricoperto con copertura idonea a resistere alle azioni di compressione meccanica che potrebbero aversi in caso di sovrapposizione delle ruote di mezzi transitanti.

La tecnologia wireless è da tempo sotto la lente dei costruttori di veicoli elettrici come tecnologia da impiegare nel prossimo futuro per facilitare la diffusione delle infrastrutture di ricarica. Una delle sfide più impegnative è quella dei costi. In un settore ove il costo delle batterie ha una sua importanza, un aggravio ulteriore dei costi del sistema di ricarica pesa per circa 3.000 – 4.000 dollari (per un sistema di 3 kW di potenza). Questo impatta sul TCO del veicolo elettrico e spinge in un angolo questa tecnologia. E' un dato di fatto che molte aziende pioniere del settore stanno rivedendo i loro piani di investimento sino alla cessione di alcuni rami d'azienda: ad esempio Qualcomm ha ceduto a WiTricity, Bombardier ha venduto a Alstom le attività. Tuttavia la tecnologia wireless è vista come promettente e diverse aziende automotive hanno in corso studi per lo sviluppo e l'integrazione sui veicoli della tecnologia senza contatto. Per i maggiori costi questi sono essenzialmente addebitabili a:

- Il circuito magnetico che necessita di nuclei di ferrite
- Il circuito elettrico per le spire realizzato con filo di Litz
- Le capacità di risonanza

Le ferriti piane hanno un costo medio tra 50-80 euro/dm³ e possono incidere per 40 % nella realizzazione delle spire di induzione. La restante parte è appannaggio del filo di Litz per il 40% e con le capacità ed il contenitore/distanziatore per il 20%.

Tra i dispositivi necessari rientra il dispositivo di allineamento che aiuta il driver a posizionare in modo utile il veicolo in modo che le due bobine si trovino in condizione geometrica ottimale entro i limiti massimi consentiti per garantire un trasferimento di energia a perdite ridotte. In genere oltre a rilevare il livello di accoppiamento tra le spire deve essere presente una interfaccia uomo-macchina per evidenziare gli scostamenti da eseguire in fase di avvicinamento alla bobina di terra. Più complessa e costosa la soluzione che preveda la possibilità di spostamento della bobina di bordo lungo gli assi x-y per eseguire il centraggio.

Interno	Punti di forza Semplificazione ricarica Sicurezza in ricarica Automazione operazione Interoperabilità	Debolezze Costo Lavori di scavo Sistemi di allineamento
Esterno	Opportunità Incremento autoconsumo Riduzione congestione rete elettrica Allargamento delle comunità energetiche	Minacce Impatto salute

L'applicazione wireless, incrementata dalla funzione V2H, si pone come importante presidio per incrementare l'autoconsumo dell'energia prodotta da fonti rinnovabili (tipicamente la solare fotovoltaica). La produzione elettrica da impianti PV installati in ambiente domestico può essere assorbita dal sistema di accumulo veicolare migliorando l'autoconsumo grazie anche alla doppia opportunità di servire il carico : per la mobilità quotidiana e per l'alimentazione domestica. Ma ancora più utile è la funzione di sfruttare energia rinnovabile prodotta in altri luoghi, come ad esempio quelli di lavoro ma anche in centri commerciali e similari, per poi riutilizzarla presso la propria abitazione. Questo trasferimento energetico "su ruote" limiterebbe la congestione di rete e sarebbe agevolato dalla semplicità delle operazioni che andrebbero in modo automatico. La funzione di autoconsumo allargato si apre al concetto di comunità energetica centrata sul concetto di scambio locale allargando il perimetro geografico di vicinanza.

L'interazione dei campi magnetici con il corpo umano è un altro degli aspetti da considerare; infatti, la protezione degli utenti dai campi magnetici dispersi è una priorità che i sistemi wireless debbono contemplare. Le elevate correnti in gioco, in questo tipo di sistemi, sono in grado di generare campi magnetici che possono superare i livelli di riferimento imposti dalla Raccomandazione Europea [6] relativa alla limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz, che mutua l'impianto regolatorio definito da ICNIRP nel 1998 [7]. L'utilizzo di sistemi di schermatura e l'utilizzo di materiali magnetici per convogliare i flussi magnetici consentono di limitare l'esposizione diretta ai campi dispersi, ma comunque è sempre necessario eseguire una valutazione dell'esposizione nelle conduzioni di utilizzo di questi sistemi quali ad esempio driver a bordo veicolo, persona passante nelle vicinanze, persona stazionante per maggior tempo. Qualora si rilevino dei superamenti dei livelli di esposizione è necessario eseguire una indagine dosimetrica per valutare che l'esposizione non comporti un superamento del limite di base definito, a 85 kHz, in termini di densità di corrente indotta nel soggetto esposto. I sistemi wireless richiedono inoltre la rilevazione della presenza di oggetti (metallici) presenti in prossimità del circuito magnetico di accoppiamento ed eventualmente alla presenza di animali che potrebbero attraversare la zona di campo durante la fase operativa.

5 Riferimenti bibliografici

- [1] V2H – Studio, progetto e sperimentazione di un sistema di ricarica wireless con funzionalità Vehicle to Home – M. Bertoluzzo RdS/PTR(2020)/055
- [2] SAE J2954 SURFACE VEHICLE RECOMMENDED PRACTICE Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology
- [3] Impedance Measurement Handbook A guide to measurement technology and techniques, 6th Edition, Keysight Technology, <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>
- [4] M. Mostak, C. Seungdeog - Optimization of ferrite core to reduce the core loss in double-D pad of wireless charging system for electric vehicles – 978-1-5386-1180-7/18 IEEE
- [5] Y. Yang, C. Jinlong, C. Xin – Design and analysis of magnetic coils for optimizing the coupling coefficient in an electric vehicle wireless power transfer system-Energies 13, 2020
- [6] Raccomandazione del Consiglio dell'Unione europea 1999/519/CE del 12 luglio 1999, pubblicata nella G.U.C.E. n. 199 del 30 luglio 1999.
- [7] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz),” Health Phys., vol. 74, (1998), pp. 494–522
- [8] Report RdS/PTR(2021)/197