



Ricerca di Sistema elettrico

Prototipo di un sistema di bobine per il trasferimento di potenza dinamico senza contatto: progetto, realizzazione e verifica sperimentale

R. Pinto, V. Lopresto, A. Zambotti

PROTOTIPO DI UN SISTEMA DI BOBINE PER IL TRASFERIMENTO DI POTENZA DINAMICO SENZA CONTATTO:
PROGETTO, REALIZZAZIONE E VERIFICA SPERIMENTALE

R. Pinto, V. Lopresto, A. Zambotti (ENEA)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Trasporto pubblico con ricarica wireless dinamica

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 LE BOBINE DI TRASMISSIONE E RICEZIONE DELLA POTENZA.....	6
2.1 CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DELLE IMPEDENZE DEL PROTOTIPO.....	7
2.1.1 <i>Metodo di misura</i>	7
2.1.2 <i>Procedura di misura</i>	7
2.1.3 <i>Incertezza della misura</i>	8
2.1.4 <i>Risultati</i>	8
3 I SISTEMI DI ALIMENTAZIONE/RICEZIONE DELLA POTENZA	9
3.1 REALIZZAZIONE DEI CIRCUITI DI ALIMENTAZIONE/RICEZIONE DELLA POTENZA	9
3.1.1 <i>Realizzazione dell'unità trasmittente</i>	11
3.1.2 <i>Realizzazione dell'unità di ricezione</i>	14
3.2 VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEI CIRCUITI DI ALIMENTAZIONE/RICEZIONE DELLA POTENZA	15
3.2.1 <i>Banchi di misura</i>	15
3.2.2 <i>Validazione sperimentale dell'intero sistema in condizioni statiche</i>	16
3.2.3 <i>Validazione dell'intero sistema in condizioni dinamiche</i>	18
3.2.4 <i>Valutazione della potenza e dell'efficienza di trasferimento in modalità di ricarica dinamica</i>	21
3.2.5 <i>Valutazione dell'efficienza di trasmissione senza contatto della potenza</i>	22
4 CONCLUSIONI.....	22
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	23

Sommario

In questo triennio, all'interno del progetto *Mobilità elettrica sostenibile* finanziato dal Piano Annuale di Realizzazione 2015 dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, si è svolta una attività riguardante il progetto e la realizzazione di un prototipo per la ricarica dinamica senza contatto dei veicoli elettrici. Questa attività ha interessato il gruppo di bioelettromagnetismo dell'ENEA, afferente alla divisione SSPT-TECS, e l'Università di Padova.

La tecnologia per la RDSC si basa sull'accoppiamento induttivo magnetico a frequenza intermedia (generalmente qualche decina di kHz) tra una serie di bobine a terra trasmettenti e una bobina ricevente montata a bordo del veicolo. Nei primi due anni si sono identificate le specifiche di progetto, la geometria ottimale per le bobine, utilizzate per il trasferimento di potenza senza contatto, e una preliminare valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici dispersi da questo tipo di struttura. Nel corso di questa annualità, si sono costruite le bobine e il prototipo è stato montato nei laboratori ENEA su un supporto di legno appositamente realizzato. Il prototipo è stato caratterizzato sperimentalmente, attraverso misure di impedenza, volte a verificarne l'aderenza con le specifiche di progetto. Dopodiché, assieme all'università di Padova, si è fornita assistenza a una azienda che ha realizzato i sistemi di trasmissione e ricezione della potenza necessaria alla ricarica di batterie al piombo.

L'aderenza alle specifiche richieste sul prototipo completo è stata verificata su banco, attraverso delle misure delle correnti in trasmissione e della tensione e della corrente in ricezione. La frequenza di lavoro è pari a circa 88 kHz e la potenza trasferita dalle bobine a terra a quella a bordo è circa pari a 3.3 ± 0.4 kW, misurata durante il movimento della bobina ricevente sulle trasmettenti. L'efficienza dell'intero sistema è superiore al 90%.

1 Introduzione

La ricarica dinamica senza contatto (RDSC) per i veicoli elettrici rappresenta una sfida tecnologica molto promettente per superare il limite rappresentato dall'autonomia delle batterie, che ancora rappresenta un ostacolo alla diffusione capillare della mobilità elettrica. L'interesse su questo tipo di tecnologia in ambito europeo e mondiale è piuttosto elevato, e la comunità scientifica, negli ultimi anni si è molto concentrata sulla ricerca di soluzioni ottimizzate e soprattutto a basso costo per la ricarica dinamica senza contatto dei veicoli elettrici, perché è considerata come una delle possibili risposte al problema dell'autonomia e del peso delle batterie a bordo. Nel corso del 2018 si è concluso il progetto europeo FeAsiBility analysis and development of on-Road charging solutions for future electric vehiCles (denominato **Fabric**), finanziato nell'ambito del 7^{mo} Programma Quadro e che ha visto la collaborazione di 25 paesi [1]. Questo progetto era finalizzato a condurre delle analisi di fattibilità e a realizzare prototipi per delle possibili soluzioni della ricarica su strada dei veicoli elettrici, con il fine di aumentarne l'autonomia. Il progetto ha avuto una durata di tre anni e un costo totale di circa 9 mln di euro ed ha evidenziato che le sfide tecnologiche su questa tematica sono ancora molte soprattutto se si ricercano soluzioni robuste e a basso costo.

Nel 2015 ENEA, in collaborazione con l'Università di Padova, ha iniziato una attività finalizzata al progetto e alla realizzazione di un prototipo per la RDSC destinato a una piccola city car realizzata in ENEA (UrBE). La RDSC si basa sull'accoppiamento induttivo magnetico a frequenza intermedia (generalmente qualche decina di kHz) tra una serie di bobine a terra (track coils) e una bobina montata a bordo del veicolo (pick up coil) [2 – 3]. La realizzazione di bobine molto robuste, in grado di fornire un trasferimento di potenza accettabile anche in presenza di disallineamento degli assi, così come una distanza tra bobine a terra e a bordo di qualche decina di centimetri e costi di realizzazione contenuti, rappresentano una sfida tecnologica molto interessante nell'ambito della mobilità elettrica e della sua sostenibilità. Nei primi due anni si sono identificate le specifiche di progetto, la geometria ottimale per le bobine utilizzate per il trasferimento di potenza senza contatto e una preliminare valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici dispersi da questo tipo di struttura. Per la valutazione dei parametri del prototipo si è utilizzato un codice di calcolo per la simulazione elettromagnetica, provvisto di un solutore FEM a bassa frequenza. La realizzazione finale del prototipo prevedeva la realizzazione di quattro bobine uguali, a geometria DD, e operanti alla frequenza di 85 kHz: tre da mettere a terra affiancate e una da mettere a bordo dell'auto. Una bobina di geometria DD è costituita da due bobine uguali a forma di D connesse in serie, ma disposte in modo tale che la corrente scorre in verso orario in una e in senso antiorario nell'altra. Questo fa sì che la bobina DD sia polarizzata, aumentando le sue proprietà di accoppiamento induttivo rispetto ad altre geometrie [3]. Inoltre con questo tipo di geometria è possibile mantenere un buon accoppiamento tra le bobine anche nel caso di piccole traslazioni longitudinali (lungo il senso di marcia) e avere una bassa sensibilità ai disallineamenti lungo la direzione ortogonale a quella di marcia [4]. Alla fine del biennio precedente il progetto della bobina è stato affidato a una ditta artigiana che, con l'ausilio del gruppo di bioelettromagnetismo ha realizzato le quattro bobine componenti il prototipo finale.

Nel corso di questa annualità, quindi, si sono costruite le bobine e il prototipo è stato montato nei laboratori ENEA su un supporto di legno appositamente realizzato. Il prototipo è stato poi caratterizzato sperimentalmente, attraverso misure di impedenza, volte a verificarne l'aderenza con le specifiche di progetto. Dopodiché, assieme all'università di Padova, si è fornita assistenza a una azienda che ha realizzato le unità di conversione/trasmissione della potenza a terra, in grado di alimentare le bobine costituenti il prototipo e le unità di ricezione/trasferimento della potenza alle batterie di bordo, necessaria alla loro ricarica durante il movimento.

2 Le bobine di trasmissione e ricezione della potenza

Le specifiche di massima delle 4 bobine uguali (Figura 1), costituenti il prototipo di RDSC, sono riassunte in Tab.1.

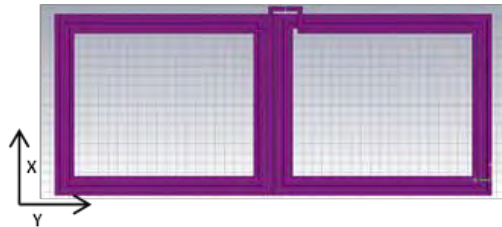


Figura 1. Modello e geometria delle bobine DD

Tabella1. Specifiche del sistema di bobine a geometria DD

Frequenza di lavoro	85 kHz
Massima dimensione lungo X	375 mm
Massima dimensione lungo Y	900 mm
Numero di avvolgimenti	4
Distanza tra gli avvolgimenti	≥ 1 mm
Distanza tra le bobine	≥ 160 mm
Mutua Induttanza	15 μ H

Il filo di Litz (circa 13 metri per ogni bobina), utilizzato per la realizzazione della bobina, è costituito da 3300 fili di rame di sezione 0,1 mm, con una sezione nominale di circa 5,74 mm: grazie a queste caratteristiche il filo è in grado di operare con correnti di 90 A ad 85 kHz con una densità di corrente pari a 3,472 A/mm². Per il rame la massima densità di corrente sostenibile varia tra 4 A/mm² per un cavo non ventilato e 6 A/mm² per un cavo in aria libera. La distanza tra gli avvolgimenti di rame è stata fissata pari a 2 mm a causa dell'ingombro del materiale che contiene il filo di Litz.

Per migliorare l'accoppiamento tra le bobine, ogni DD coil è stata equipaggiata con un core costituito da 7 barre di ferriti, costituite ognuna da 10 ferriti N87 'I' core delle dimensioni di 96 x 28 x 16 mm³. Da progetto, le barre di ferrite dovevano essere equidistanti lungo la direzione X (Figura 2).

Per mantenere la singola bobina e le ferriti nella posizione stabilita, è stato progettato un supporto realizzato in Polyoxymethylene (POM-C), una termoplastica con elevate forza, rigidità e durezza meccaniche. Le misure finali del coperchio sono 980 x 420 x 45 mm³. A questo supporto è stato aggiunto un coperchio realizzato con lo stesso materiale e di dimensioni pari a 980 x 420 x 25 mm³ ad ulteriore protezione delle bobine.

Una delle bobine consegnate dopo la loro realizzazione è mostrata in Figura 2.



Figura 2. Bobine DD realizzate per il prototipo di RDSC, sono evidenti le 7 barre di ferrite e il supporto in POM-C. Il coperchio è stato rimosso per la visualizzazione della geometria

2.1 Caratterizzazione sperimentale delle impedenze del prototipo

Per verificare l'aderenza del prototipo alle specifiche richieste, è stata eseguita la caratterizzazione delle impedenze, in termini di auto induttanza e mutua induttanza.

Per sistemare le bobine nella posizione corretta e eseguire le misure è stato realizzato appositamente un banco sperimentale in legno (Figura 3).



Figura 3. Immagine delle bobine sistemate sul banco sperimentale a simulare il prototipo finale per le misure di impedenza

Per la misura della induttanza delle singole bobine e della mutua induttanza della bobina a bordo rispetto quelle posizionate a terra è stato utilizzato un analizzatore di impedenze vettoriale Keysight EN5061B (5 Hz – 3 GHz).

2.1.1 Metodo di misura

Le misure di induttanza e mutua induttanza sono state eseguite secondo le metodologie descritte in [5].

Per le misure di induttanza, la bobina in esame viene 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 4 e misurando le induttanze L_a e L_0 .

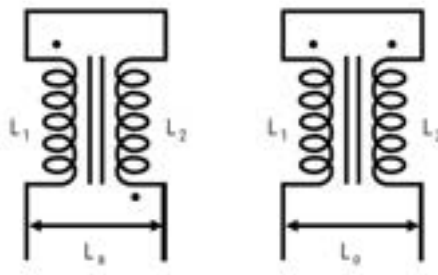


Figura 4. Connessioni serie delle bobine per la misura della mutua induttanza

Nella prima configurazione

$$L_a = L_1 + L_2 + 2M$$

Nella seconda configurazione

$$L_0 = L_1 + L_2 - 2M$$

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

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

2.1.2 Procedura di misura

Le bobine sono state posizionate così come mostrato in Figura 3. Il banco di legno è stato costruito in modo

tale da mantenere la bobina a bordo (chiamata L0) a una distanza pari a 16.5 ± 5 mm dalle bobine a terra. Inoltre il carrello di legno è in grado di spostarsi lungo la direzione y con una precisione di ± 5 mm. Le bobine a terra sono state posizionate a 65 mm l'una dall'altra: tenuto conto della dimensione dei contenitori e l'ingombro dei fili la distanza contenitore-contenitore è stata pertanto fissata a 20 mm.

L'induttanza delle 4 bobine e la mutua induttanza della bobina a bordo (L0) rispetto alle altre a terra (L1, L2, L3) è stata misurata simulando il passaggio della prima sulle seconde, su una distanza totale di 120 cm a passi di 10 ± 0.5 cm. In questo modo è stato possibile caratterizzare le impedenze del prototipo simulando a passi discreti le reali condizioni di utilizzo.

Una coppia di bobine DD ha una bassa sensibilità ai disallineamenti lungo la direzione ortogonale a quella di marcia [4]. Questa affermazione è stata valutata considerando una singola coppia di bobine e facendo scorrere la bobina a bordo su quella a terra lungo la direzione X con passi discreti di 5 ± 0.5 cm.

2.1.3 Incertezza della misura

La valutazione di incertezza combinata associata alla misura è stata fatta tenendo conto di questi contributi:

- Accuratezza dello strumento (10%) a cui è stata associata una distribuzione normale per la valutazione dell'incertezza (fattore di divisione pari a 2);
- Variazione del valore della mutua induttanza, dovuta alla precisione del posizionamento delle bobine (indicativamente pari a ± 5 mm lungo l'asse X) valutata mediante simulazioni numeriche e pari a 0.54 %. Per la valutazione dell'incertezza espansa a questo dato è stato associata una distribuzione rettangolare e quindi un fattore di divisione pari a $\sqrt{3}$;
- Variazione del valore della mutua induttanza, dovuta alla precisione del posizionamento delle bobine (indicativamente pari a ± 5 mm lungo l'asse Y) valutata mediante simulazioni numeriche e pari a 0.54 %. Per la valutazione dell'incertezza espansa a questo dato è stato associata una distribuzione rettangolare e quindi un fattore di divisione pari a $\sqrt{3}$;
- Variazione del valore della mutua induttanza, dovuta alla precisione del posizionamento delle bobine (indicativamente pari a ± 5 mm lungo l'asse z) valutata mediante simulazioni numeriche e pari a 8.7 %. Per la valutazione dell'incertezza espansa a questo dato è stato associata una distribuzione rettangolare e quindi un fattore di divisione pari a $\sqrt{3}$;
- Variazione del valore della induttanza, dovuta alla precisione del posizionamento delle bobine (indicativamente pari a ± 5 mm lungo l'asse z) valutata mediante simulazioni numeriche e pari a 1.2 %. Per la valutazione dell'incertezza espansa a questo dato è stato associata una distribuzione rettangolare e quindi un fattore di divisione pari a $\sqrt{3}$;

Da questi dati, si è valutata l'incertezza combinata associata alla misura della induttanza che è pari al $\pm 5\%$: considerando un fattore di copertura $k = 2$ (livello di confidenza pari al 95%), l'incertezza espansa è uguale a $\pm 10\%$. Analogamente, l'incertezza espansa associata alla misura di mutua induttanza è invece $\pm 14,2\%$, se si considera, anche in questo caso, un fattore di copertura pari a 2.

2.1.4 Risultati

Nelle Figure 5a e 5b sono mostrati i risultati delle misure di impedenza eseguite sul prototipo secondo le metodologie indicate nel paragrafo precedente. Ogni dato misurato è indicato con la sua incertezza mediante barre di errore.

In Figura 5a, sono mostrate le induttanze di tutte e 4 le bobine che costituiscono il prototipo, al variare della posizione della bobina di bordo L0 rispetto alle altre a terra (L1, L2, L3). La posizione 0 corrisponde alla posizione per la quale la bobina di bordo è esattamente allineata con la bobina di terra centrale (L2). Le posizioni ± 440 mm corrispondono alle posizioni per cui la bobina a bordo si trova esattamente allineata con le bobine laterali L3 e L1 rispettivamente. Come è evidente dalla Figura 5a l'induttanza della bobina a bordo è perlopiù costante ($57,4 \pm 0.3$ μ H) durante il suo scorrimento sulle altre e questo permette di mantenere la risonanza del circuito, e quindi il suo massimo accoppiamento e rendimento, per tutto il passaggio della bobina a bordo su quelle a terra.

In Figura 5b, sono mostrate le mutue induttanze della bobina a bordo rispetto a quelle a terra (M01, M02, M03) durante lo scorrimento di quest'ultima sulle altre. Questa misura ha confermato che la somma delle mutue induttanze è anch'essa costante durante lo scorrimento ($15,5 \pm 0.6 \mu\text{H}$, da - 440 a + 440 mm, posizioni per le quali la bobina a bordo si accoppia esattamente su quelle a terra, esterne). Questa caratteristica fa sì che il trasferimento di potenza dalle bobine a terra a quella a bordo e quindi alla batteria è costante durante il movimento.

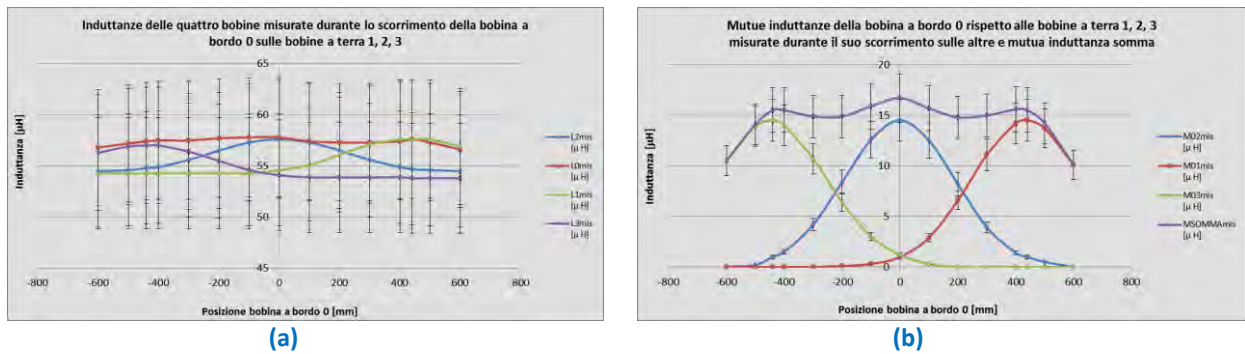


Figura 5. valori misurati delle induttanze delle 4 bobine (a) e delle mutue induttanze della bobina a bordo rispetto alle altre a terra (b), per passi discreti (10 cm) dello scorrimento della bobina a bordo

In Figura 6 è mostrato l'andamento della mutua induttanza della bobina a bordo rispetto una delle tre a terra (M02) durante il suo spostamento trasversale lungo la direzione X. In questo caso è evidente un



Figura 6. valori misurati della mutua induttanza della bobina a bordo con una delle bobine a terra relativi a disallineamenti lungo la direzione X, ortogonale alla direzione di marcia.

accoppiamento ancora accettabile ($M02 > 10 \mu\text{H}$) fino a spostamenti trasversali di 10 cm rispetto alla posizione di accoppiamento ottimale. Per disallineamenti dell'ordine di 30 cm l'accoppiamento è nullo.

3 I sistemi di alimentazione/ricezione della potenza

3.1 Realizzazione dei circuiti di alimentazione/ricezione della potenza

Il sistema di conversione statico dell'energia elettrica per il nostro prototipo di RDSC è stato realizzato secondo le specifiche riportate in [6], finalizzate alla ricarica di un piccolo veicolo elettrico con bacco batteria a 48 V. La potenza nominale di ricarica del sistema deve essere pari a 3 kW [6].

Lo schema di principio del sistema di conversione è mostrato nella Figura 7. Esso è composto da tre unità trasmettenti (TX) ed una ricevente (RX) a bordo veicolo.

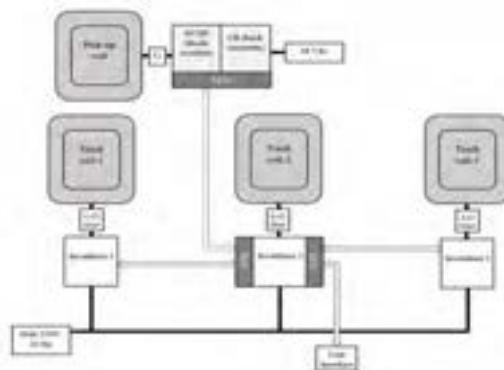


Figura 7. schema di principio del sistema di RDSC.

La singola unità di conversione trasmettente è composta da un collegamento in cascata di un raddrizzatore, collegato alla rete di distribuzione in bassa tensione, ed un inverter monofase H-bridge. In Figura 8 è mostrato lo schema della sezione di potenza dell'unità che alimenta la bobina TX e la rete di compensazione LC così come definita in [6]. V_{TX_out} è la tensione di uscita dal trasmettitore e in ingresso al circuito di compensazione e quindi alla bobina TX.

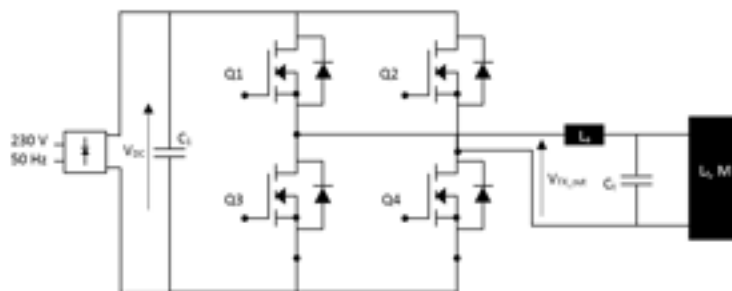


Figura 8. schema di una singola unità trasmettente

Lo schema della sezione ricevente a bordo veicolo è riportato in Figura 9. La rete compensatrice è costituita, in questo caso, da un solo condensatore serie. A valle del condensatore è collegato uno stadio raddrizzatore che alimenta un 'buck converter' con tensione di uscita variabile nell'intervallo 39-54.6 V [6].

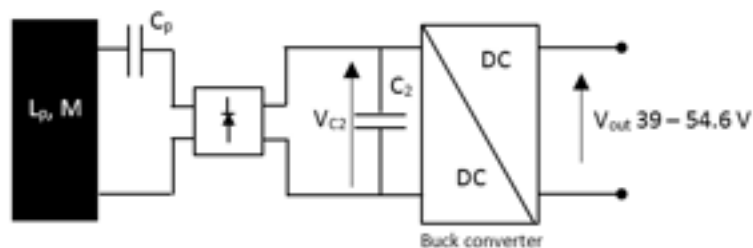


Figura 9. schema dell'unità ricevente

Nella Tabella 2 sono riportati i parametri caratteristici del sistema di RDSC caratterizzato, in fase di realizzazione, da una frequenza di risonanza pari a 88.6 kHz. Questa frequenza rientra comunque nelle

specifiche richieste, in quanto la frequenza di lavoro del sistema doveva essere compresa nell'intervallo 81 – 90 kHz [6].

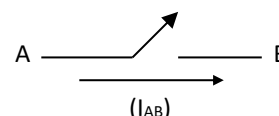
Tabella2. Parametri del sistema di RDSC

Denominazione	Simbolo	Valore
Potenza nominale di uscita	P_O	3 kW
Condensatore di uscita DC-link	C_1	1.2 mF
Induttanza bobina ausiliaria	L_a	58 μ H
Condensatore bobina TX	C_t	55.52 nF
Induttanza bobina TX	L_t	58 μ H
Induttanza bobina RX	L_p	58 μ H
Condensatore bobina RX	C_p	55.52 nF
Condensatore filtro	C_2	7.2 mF

3.1.1 Realizzazione dell'unità trasmittente

Fissata la topologia e le caratteristiche dei stadi di conversione, la scelta del giusto interruttore statico di potenza è stata fatta considerando essenzialmente le tre grandezze:

- tensione presente ai suoi morsetti (V_{AB})
- corrente che lo attraversa (I_{AB})
- frequenza di switching



In base a queste tre grandezze viene scelta sia la *taglia* del dispositivo che la sua *tecnologia costruttiva*.

Data la frequenza di lavoro delle sezioni di conversione statica dell'energia elettrica, compresa nell'intervallo 81-90 kHz, i dispositivi utilizzati sono stati dei MOSFET. Inoltre per via della natura risonante della rete di compensazione sono stati scelti dei MOSFET tipo-N MDmesh™ **STW65N65DM2AG** della **STMicroelectronics** con *fast-recovery body diode*. I Mosfet sono caratterizzati da una tensione di bloccaggio 650 V, corrente 60 A e sono *automotive-grade*. Per la scelta dei diodi dei ponti raddrizzatori sono stati considerati i seguenti fattori:

- Tensione ai capi di ciascun diodo
- Corrente di spunto
- Corrente assorbita dal carico
- Frequenza



Nel dettaglio, per lo stadio AC/DC delle unità trasmittente è stato utilizzato un ponte di Graetz standard, lento (**FAGOR Electronica FB5002-B80/70-50**), mentre per lo stadio AC/DC del sistema a bordo sono stati utilizzati dei diodi ultrafast discreti **STTH61W04S** della **STMicroelectronics**. Per il *buck converter* è stato utilizzato un MOSFET **IXTK120N65X2** della **IXYS** e per il diodo fast di free-wheeling il dispositivo **STTH200W06TV1** della **STMicroelectronics**.

Per l'implementazione delle unità di controllo (lato trasmettitore e ricevente) è stato utilizzato il Digital Board Processing (DSP) della **Texas Instruments TMDSPREX28335**.

La Figura10 mostra la Printed Circuit Board (PCB) realizzato per la ECU (Electronic Control Unit) della sezione trasmittente.

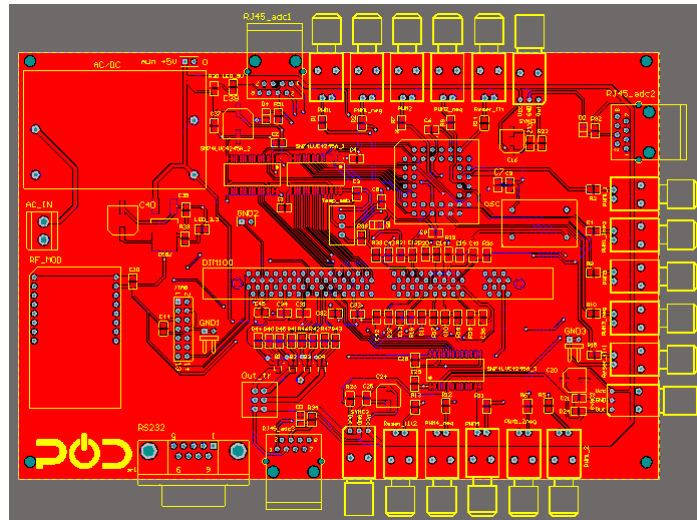


Figura 10. PCB della ECU sezione trasmittente.

Nella Figura 10, sono mostrati i diversi blocchi necessari per il controllo delle tre unità trasmittenti (TX_i, con i=1,2,3).

- I blocchi **TX_i PWMs** provvedono alla trasmissione in fibra ottica dei segnali PWMs (dall'inglese Pulse Width Modulation) delle diverse unità, modulate secondo una tecnica di modulazione *phase shift*;
- I blocchi **TX_i fault** consentono, attraverso una trasmissione in fibra ottica, di ricevere e resettare un eventuale segnale di *fault* dovuto a cortocircuito di corrente;
- I blocchi **TX_i sensori** riportano i segnali provenienti dai sensori dei TX_i in ingresso ai convertitori analogico/digitali (ADC) del DSP. Le grandezze di retroazione sono le correnti delle tre unità inverter, le tensioni dei dc-link (V_{DC} di Figura 8), le temperature dell'elettronica.
- Il blocco **Modulo Radio Frequenza (RF)** consente di ricevere le seguenti grandezze della sezione ricevente: tensione e corrente di batteria, tensione in uscita dallo stadio AC/DC e temperatura dell'elettronica.
- Blocco **Human Machine Interface (HMI)** per la gestione della interfaccia utente

L'implementazione delle unità inverter delle tre sezioni trasmittenti ha previsto la progettazione e la realizzazione di una soluzione modulare che consiste in una board per la sezione di potenza (Figura 11) ed una per il driving (Figura 12).

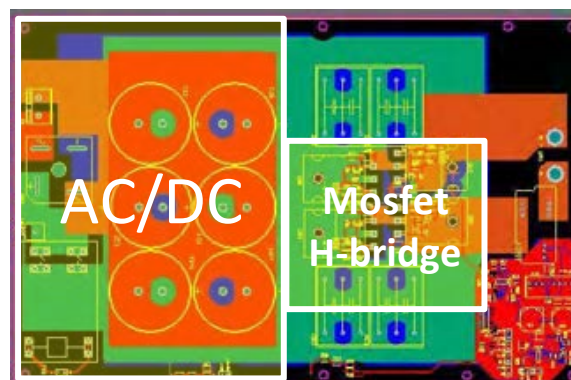


Figura 11. PCB della power board degli inverter delle tre unità trasmittenti.

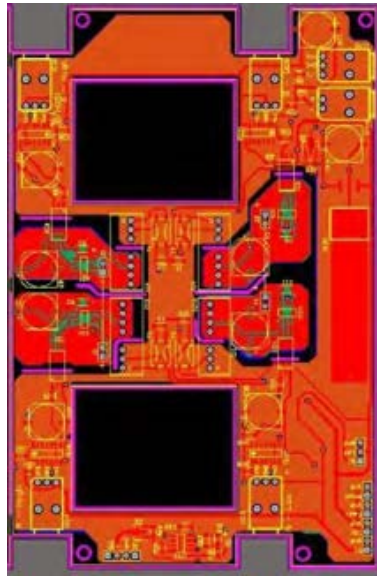


Figura 12. PCB della driver board con ricezione in fibra ottica degli inverter delle tre unità trasmettenti.

Per ridurre le induttanze di parassite e consentire delle buone performance in termini di transitori di commutazione sono state impiegate delle soluzioni a 4 layers.

Per quanto riguarda il pilotaggio dei MOSFET, è stato necessario isolare galvanicamente la parte di controllo da quella di potenza, così come riportato nello schema di principio seguente mostrato in Figura 13.

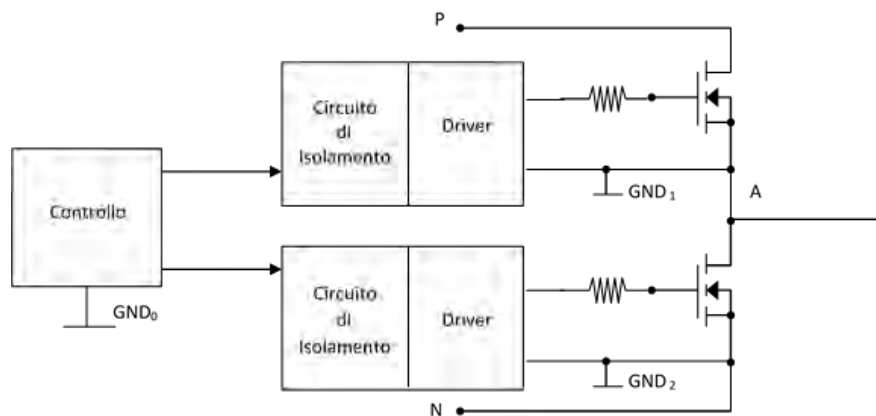


Figura 13. Schema di principio della sezione driver.

Infatti, se le masse $GND_0 - GND_1 - GND_2$ non fossero isolate, il punto A si troverebbe allo stesso potenziale del punto N, che equivarrebbe a cortocircuitare il MOSFET inferiore. Affinché il circuito funzioni correttamente, il segnale di comando portato sulla gate di ciascun MOSFET deve essere riferito al source dello stesso e flottante rispetto agli altri punti del circuito. Il metodo più utilizzato per le basse-medie potenze è l'isolamento mediante fotoisolatore. Esso è costituito essenzialmente da un diodo led e un transistor fotosensibile (Figura 14).

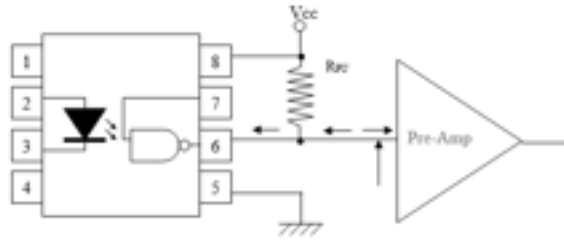


Figura 14. Schema di collegamento di un fotoisolatore.

Nella soluzione implementata, sono stati utilizzati i componenti Si826x come isolatore ed il MIC4452 per la sezione di amplificazione del segnale per il corretto pilotaggio dei MOSFET. La Figura 15 mostra il PCB realizzato per il montaggio dei componenti delle rete di compensazione delle tre unità trasmettenti.

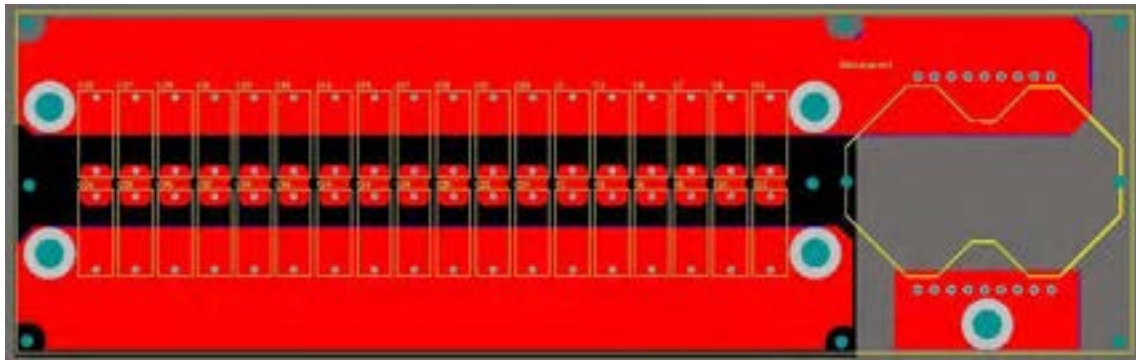


Figura 15. PCB della rete di compensazione.

3.1.2 Realizzazione dell'unità di ricezione

Nella Figura 16 è riportato il PCB realizzato per la sezione di conversione per lo stadio ricevente. È possibile notare la sezione di controllo (ECU ricevette) con il modulo RF ed la parte di elettronica di potenza composta dallo stadio raddrizzatore e in cascata il *buck converter*.

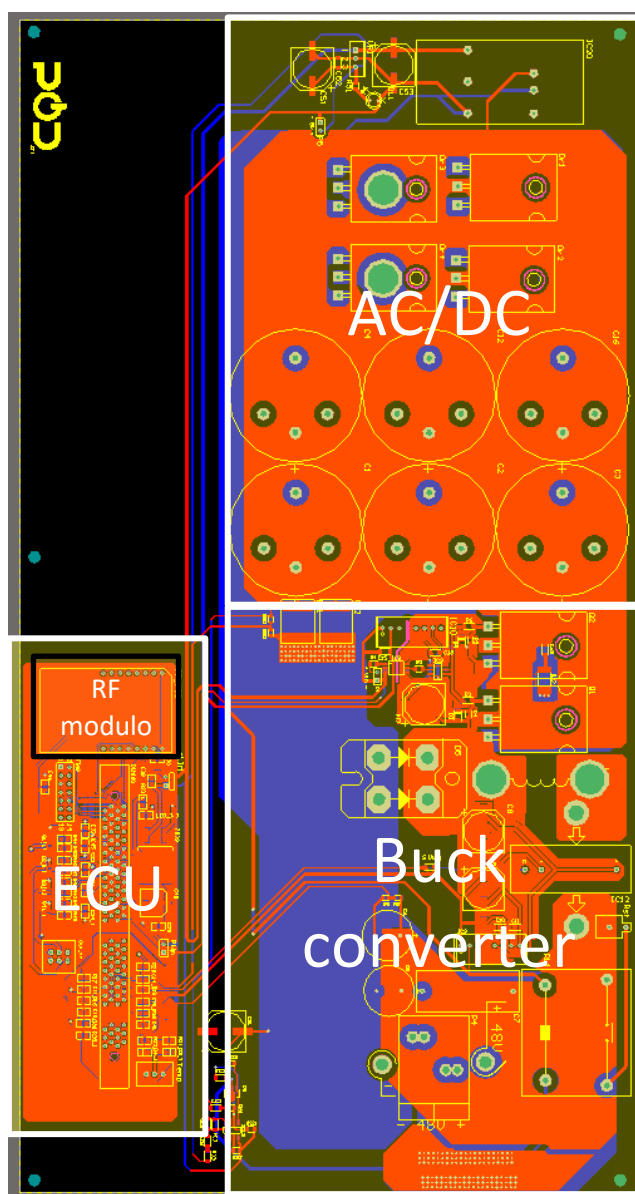


Figura 15. PCB della sezione ricevente a bordo veicolo

3.2 Validazione sperimentale dei circuiti di alimentazione/ricezione della potenza

3.2.1 Banchi di misura

La verifica sperimentale del funzionamento del prototipo di RDSC è stata eseguita attraverso le misure di tensione e corrente in uscita dai tre sistemi di trasmissione e in uscita dal sistema di ricezione. Le misure sono state eseguite con la strumentazione seguente:

- Oscilloscopio Tektronix MSO 4054B
- Sonda di corrente Tektronix TCP0030
- Sonda di tensione Tektronix P5205

Il sistema è stato alimentato con un alimentatore TopCon DC power Supply TC.P.10.40.400.PV.HMI. Il carico al sistema era una resistenza di carico programmabile (Programmable Load Chroma model 63804 4.5 kW/ 45 A/ 350 V).

In una prima fase, i circuiti di alimentazione e ricezione sono stati provati in condizioni di trasmissione senza contatto della potenza in condizioni statiche. Si è, quindi, considerata una singola coppia di bobine TX/RX (Figura 17).

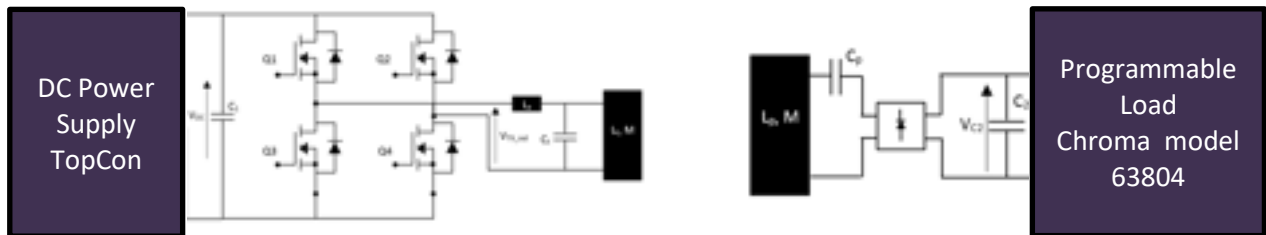


Figura 17. Sistema a singola coppia di bobine utilizzato nella prima fase di verifica

I segnali misurati sono stati la tensione di trasmissione V_{TX_OUT} e la relativa corrente di trasmissione. La misura sul prototipo finale, costituito da tre sistemi di trasmissione della potenza a terra e un sistema a bordo, è stata eseguita sul sistema di Figura 18.

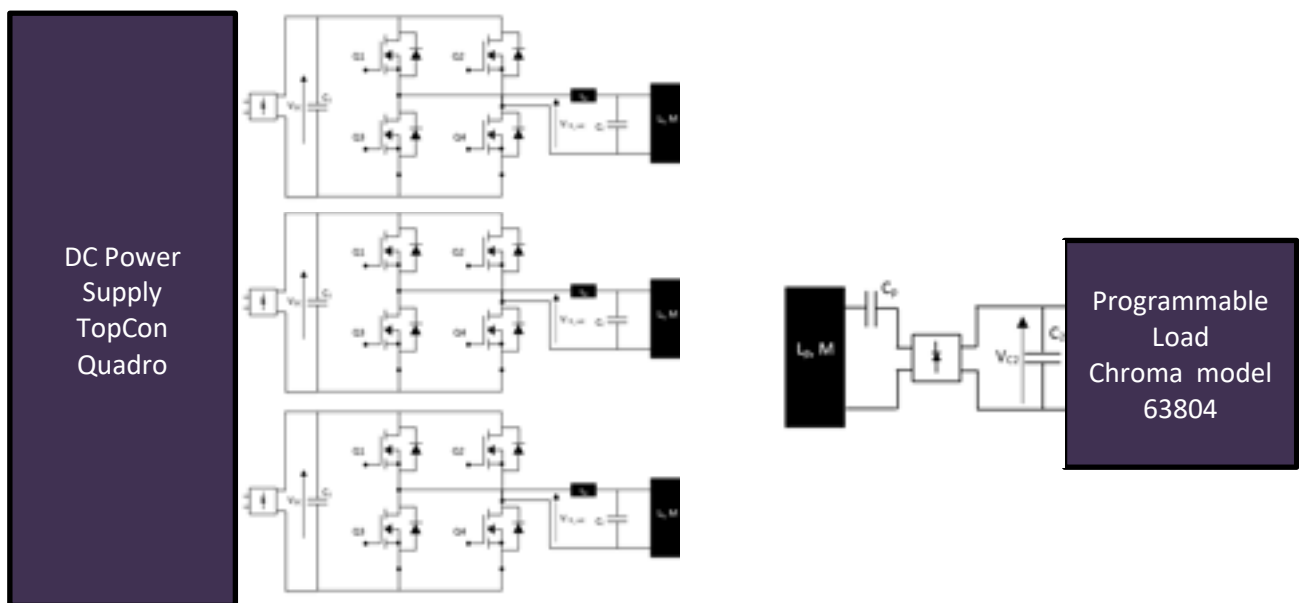


Figura 18. Prototipo completo nella configurazione di misura

In questo caso si sono misurate le correnti dei tre stadi di trasmissione indipendenti e la tensione e la corrente dello stadio di ricezione.

3.2.2 Validazione sperimentale dell'intero sistema in condizioni statiche

In Figura 19 sono mostrati gli andamenti di tensione (blu) e corrente (giallo) in uscita dal trasmettitore quando le bobine sono poste a tre diverse distanze l'una dall'altra: 15 cm (distanza effettiva tra i coperchi 10 cm), 18 cm (distanza effettiva tra i coperchi 13 cm) e infine 20 cm (distanza effettiva tra i coperchi 15 cm). La tensione V_{DC} è pari a 320 V e la resistenza elettronica di carico impostata a 2.16Ω .

La frequenza della corrente di uscita dai trasmettitori è pari a circa 89 kHz, (si ricorda che, da specifiche, la frequenza di lavoro doveva rientrare nella banda 81 – 90 kHz). Come atteso, all'aumentare della distanza tra le bobine, le condizioni di accoppiamento peggiorano e la potenza disponibile in uscita dai trasmettitori diminuisce. Il livello di potenza richiesto dalle specifiche (Tabella 2) e pari a 3 kW, si ottiene alla distanza di 15 cm tra le bobine (la corrente di picco all'inverter è pari a 17.5 A, Figura 19a). Un altro effetto dell'aumentare della distanza tra le bobine è l'insorgenza di nuove armoniche frequenziali nel segnale in corrente, che confermano la degradazione del segnale di uscita.

Dai risultati ottenuti con queste prove preliminari, si è deciso di eseguire tutti i test successivi disponendo le bobine a una distanza di 15 cm (distanza tra i coperchi 10 cm). In questo caso la mutua induttanza misurata è pari a $16.5 \mu H$.

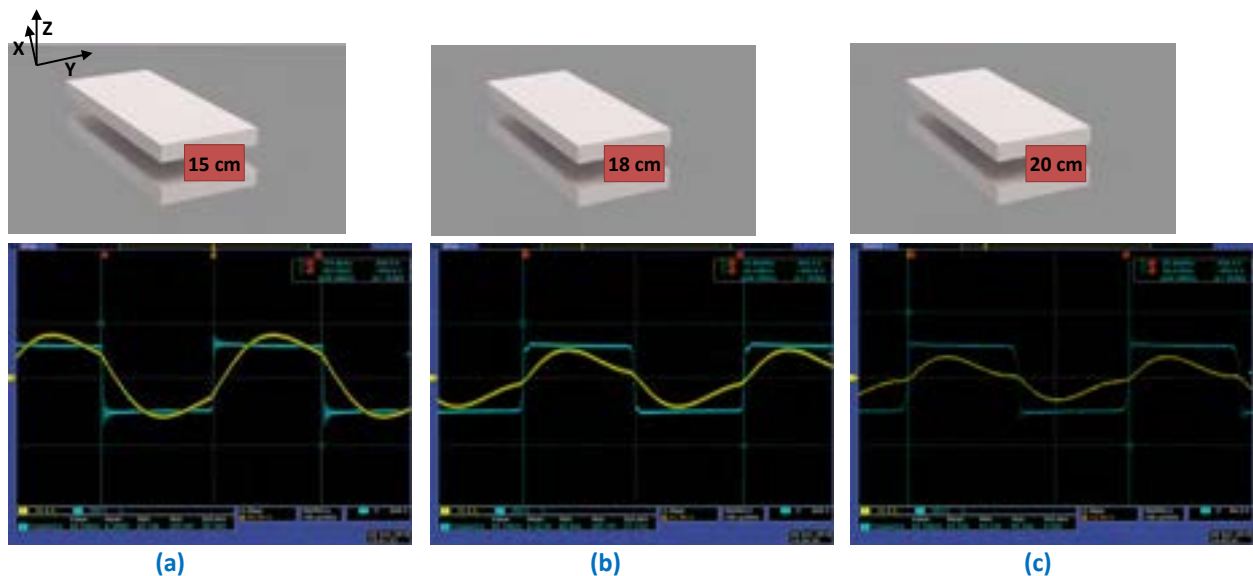


Figura 19: Segnali di tensione (blu) e corrente (giallo) in uscita dal trasmettitore quando una singola coppia di bobine è posta a una distanza di (a) 15 cm, (b) 18 cm, (c) 20 cm.

La prova successiva ha riguardato la valutazione della corrente e della tensione, in uscita dal trasmettitore, nel caso di disallineamento delle bobine lungo la direzione di marcia (direzione Y). In questo caso la tensione e la corrente in uscita dai trasmettitori sono state misurate in tre diverse posizioni della bobina RX rispetto alla bobina TX: una sopra all'altra, perfettamente accoppiate (scorrimento = 0), parzialmente accoppiate (scorrimento = 21 cm), totalmente disaccoppiate (scorrimento = 42 cm).

In Figura 20 sono mostrati gli andamenti di tensione e corrente in uscita dal trasmettitore nelle condizioni sopra descritte. Anche in questo caso il deterioramento del segnale di corrente dovuto al disallineamento è evidente rispetto alla condizione ottimale di massimo accoppiamento (Figura 20a)

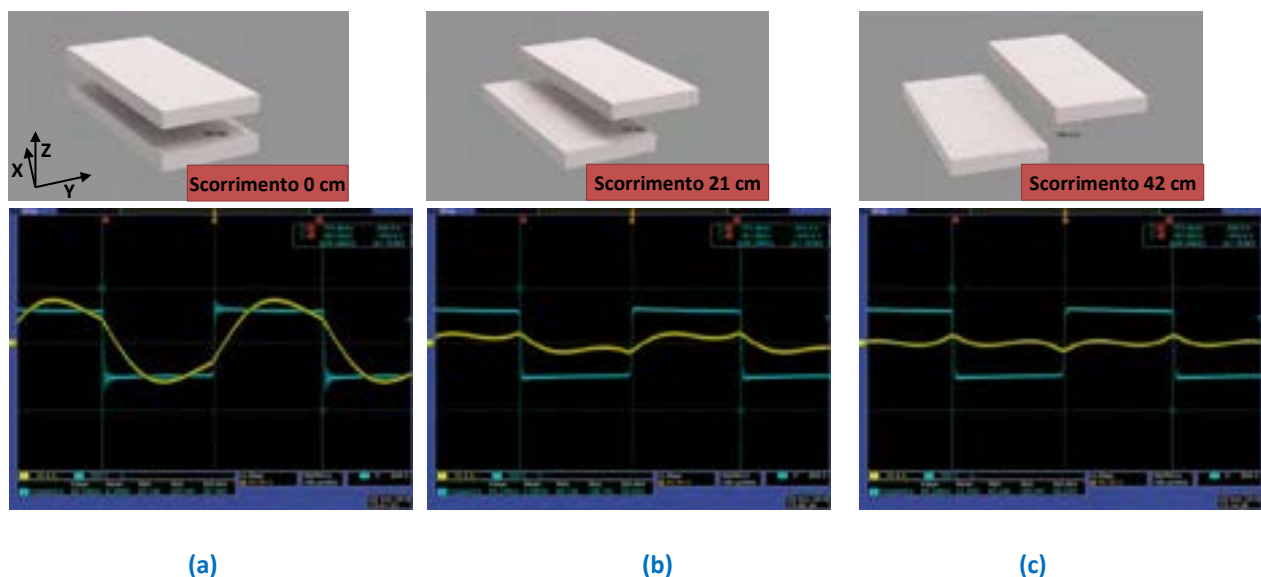


Figura 20: Segnali di tensione (blu) e corrente (giallo) in uscita dal trasmettitore quando la bobina RX si sposta lungo la direzione di marcia (Y) di distanze pari a (a) 0 cm, (b) 21 cm, (c) 42 cm.

La prova successiva ha riguardato la valutazione dei segnali di tensione e corrente, in uscita dal trasmettitore, al variare della tensione di alimentazione della rete ($\pm 10\%$ rispetto alla tensione nominale di 320 V).

In Figura 21 è mostrato l'andamento della tensione e della corrente in uscita dal trasmettitore se la tensione V_{DC} è pari a 360 V (+ 10%).

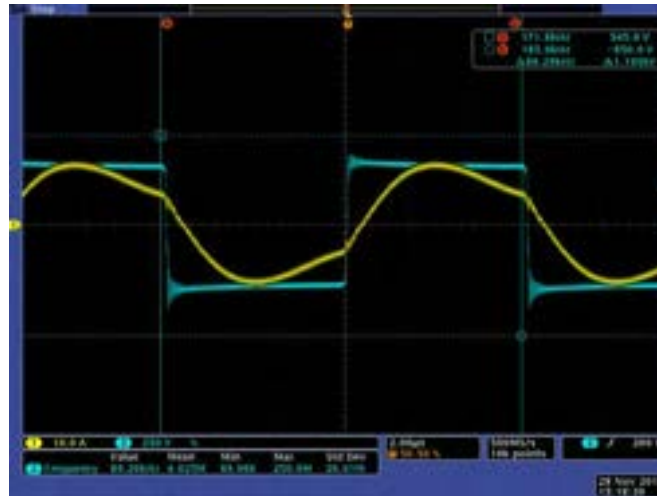


Figura 21: Segnali di tensione (blu) e corrente (giallo) in uscita dal trasmettitore quando la tensione nominale di alimentazione viene impostata a 360 V (+ 10% della tensione nominale di funzionamento)

Anche in questo caso il trasmettitore continua a funzionare come desiderato, senza particolari deterioramenti del segnale in uscita.

3.2.3 Validazione dell'intero sistema in condizioni dinamiche

In Figura 22a è mostrato il sistema trasmettente completo con i tre inverter e le tre ECU. In Figura 22b è mostrata l'elettronica dello stadio di uscita, così come sono stati realizzati e assemblati.

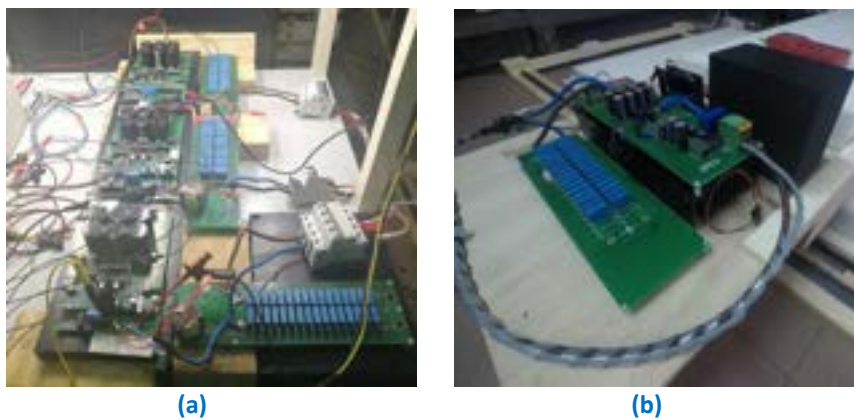


Figura 22: (a) I tre stadi di trasmissione del segnale con i tre inverter e le tre ECU; (b) stadio di ricezione del segnale

A questo punto, si è verificato il funzionamento del prototipo completo, costituito da tre bobine TX a terra, a una distanza reciproca di 3 cm, e una bobina RX a bordo, posta a una distanza di 15 cm da quelle a terra. La bobina RX è stata fatta scorrere, lungo la direzione di marcia (Y), per passi discreti, su quelle a terra: 'scorrimento = 0' è la posizione per cui la bobina RX (L0) è esattamente sovrapposta alla bobina centrale (L2). Nelle figure successive (Figure 23-30) sono mostrati gli andamenti delle tre correnti di TX:

- TX1, segnale blu, L1
- TX2, segnale rosso, L2
- TX3, segnale giallo, L3

In ricezione, per ogni posizione considerata si sono misurati:

- RX1, segnale blu, tensione di uscita
- RX2, segnale giallo, corrente di uscita.

In Figura 23b è mostrato l'andamento delle tre correnti di trasmissione nel caso in cui la bobina L0 è totalmente disaccoppiata dalle tre a terra (**scorrimento = -87 cm**). In questo caso le tre correnti di trasmissione sono uguali e fortemente distorte.

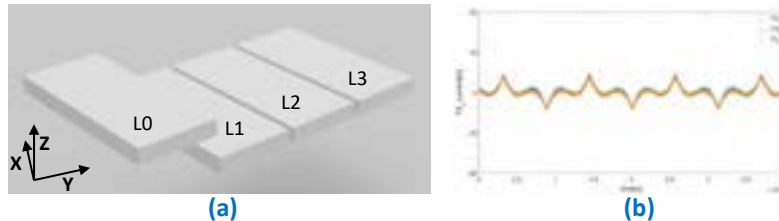


Figura 23: Scorrimento = -87 cm: (a) geometria, (b) andamento delle correnti di trasmissione

In Figura 24b è mostrato l'andamento delle tre correnti di trasmissione nel caso in cui la bobina L0 è parzialmente accoppiata con L1 e totalmente disaccoppiata da L2 e L3 (**scorrimento = -64 cm**). In questo caso la corrente TX1 (blu) inizia a differenziarsi dalle altre e nel circuito di ricezione inizia ad esserci una corrente di circa 10 A (Figura 24c) e una tensione di circa 20 V. Le altre due correnti di trasmissione (TX2, TX3) hanno lo stesso andamento del caso precedente.

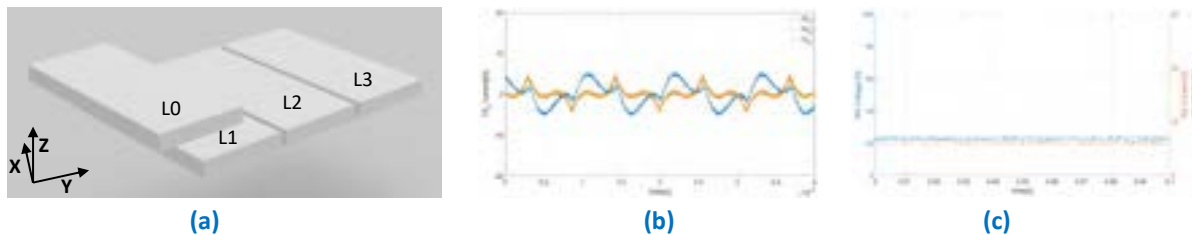


Figura 24: Scorrimento = -64 cm: (a) geometria, (b) andamento delle correnti di trasmissione, (c) andamento della corrente e della tensione in ricezione

In Figura 25b è mostrato l'andamento delle tre correnti di trasmissione nel caso in cui la bobina L0 è totalmente accoppiata con L1 e totalmente disaccoppiata da L2 e L3 (**scorrimento = -45 cm**). In questo caso la corrente TX1 (blu) ha un andamento sinusoidale e un valore di picco di circa 18 A. Nel circuito di ricezione si possono misurare una corrente di circa 35 A e una tensione di circa 80 V (Figura 25c). Le altre due correnti di trasmissione (TX2, TX3) hanno lo stesso andamento dei casi precedenti.

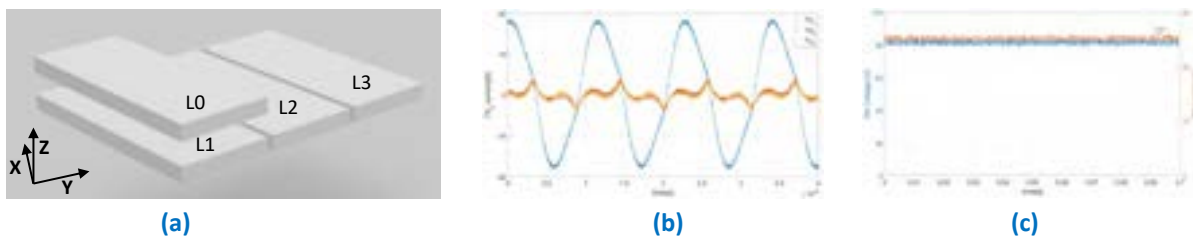


Figura 25: Scorrimento = -45 cm: (a) geometria, (b) andamento delle correnti di trasmissione, (c) andamento della corrente e della tensione in ricezione

In Figura 26b è mostrato l'andamento delle tre correnti di trasmissione nel caso in cui la bobina L0 è parzialmente accoppiata sia con L1 che con L2 e totalmente disaccoppiata da L3 (**scorrimento = -22.5 cm**). In questo caso le correnti TX1 (blu) e TX2 (rosso) hanno un andamento sovrapponibile e un valore di picco di circa 10 A. Analogamente al caso precedente, nel circuito di ricezione si possono misurare una corrente di

circa 35 A e una tensione di circa 80 V (Figura 26c). L'altra corrente di trasmissione (TX3) ha lo stesso andamento dei casi precedenti.

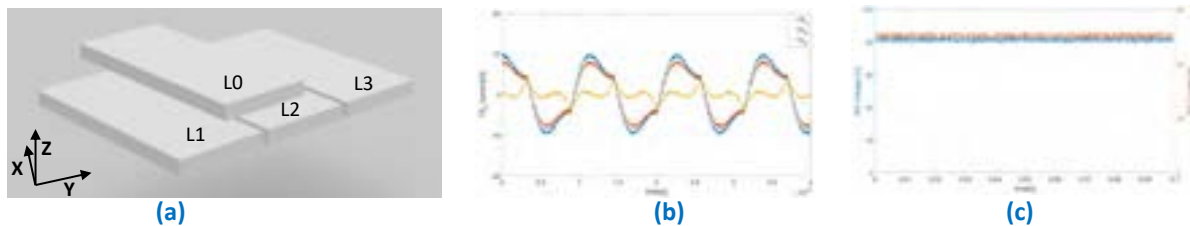


Figura 26: Scorrimento = -22.5 cm: (a) geometria, (b) andamento delle correnti di trasmissione, (c) andamento della corrente e della tensione in ricezione

In Figura 27b è mostrato l'andamento delle tre correnti di trasmissione nel caso in cui la bobina L0 è totalmente accoppiata con L2 e totalmente disaccoppiata da L1 e L3 (**scorrimento = 0 cm**). In questo caso la corrente TX2 (rosso) ha un andamento sinusoidale con un valore di picco pari a circa 18 A. Anche in questo caso, nel circuito di ricezione si possono misurare una corrente di circa 35 A e una tensione di circa 80 V (Figura 27c). Le altre correnti di trasmissione (TX1 e TX3) hanno l'atteso andamento distorto che si ha nelle correnti di trasmissione quando le bobine sono disaccoppiate.

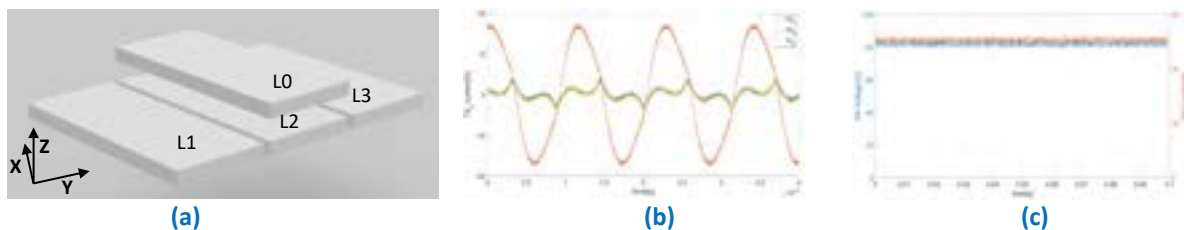


Figura 27: Scorrimento = 0 cm: (a) geometria, (b) andamento delle correnti di trasmissione, (c) andamento della corrente e della tensione in ricezione

In Figura 28b è mostrato l'andamento delle tre correnti di trasmissione nel caso in cui la bobina L0 è parzialmente accoppiata con L2 e L3 e totalmente disaccoppiata da L1 (**scorrimento = 22.5 cm**). In questo caso le correnti TX2 (rosso) e TX3 (giallo) hanno andamenti sovrapponibili con un valore di picco pari a circa 10 A. Nel circuito di ricezione si possono misurare una corrente di circa 35 A e una tensione di circa 80 V (Figura 28c). L'altra corrente di trasmissione (TX1) ha l'atteso andamento distorto che si ha nel caso di bobine disaccoppiate.

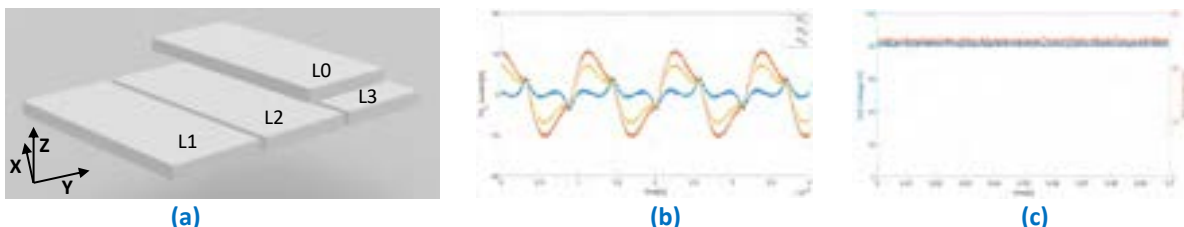


Figura 28: Scorrimento = 22.5 cm: (a) geometria, (b) andamento delle correnti di trasmissione, (c) andamento della corrente e della tensione in ricezione

In Figura 29b è mostrato l'andamento delle tre correnti di trasmissione nel caso in cui la bobina L0 è completamente accoppiata con L3 e totalmente disaccoppiata da L1 e L2 (**scorrimento = 45 cm**). In questo caso la corrente TX3 (giallo) ha un andamento sinusoidale con un valore di picco pari a circa 18 A. Nel circuito di ricezione si possono misurare una corrente di circa 35 A e una tensione di circa 80 V (Figura 29c). Le altre correnti di trasmissione (TX1 e TX2) hanno l'atteso andamento distorto che si ha nel caso di bobine disaccoppiate.

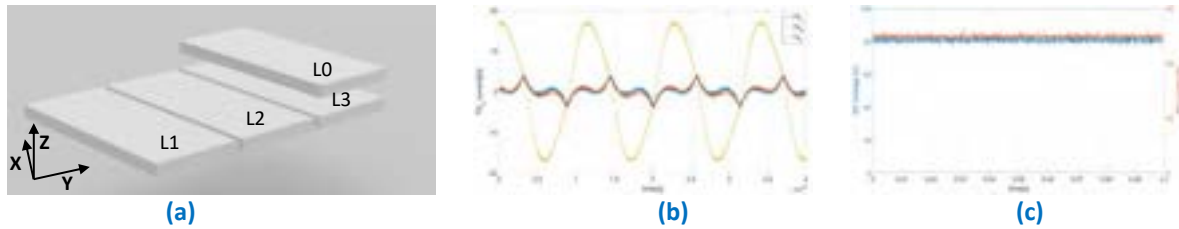


Figura 29: Scorrimento = 45 cm: (a) geometria, (b) andamento delle correnti di trasmissione, (c) andamento della corrente e della tensione in ricezione

In Figura 29b è mostrato l'andamento delle tre correnti di trasmissione nel caso in cui la bobina L0 è parzialmente accoppiata con L3 e totalmente disaccoppiata da L1 e L2 (**scorrimento = 64 cm**). In questo caso la corrente TX3 (gialla) si differenzia dalle altre, ad indicare che un parziale trasferimento di potenza è ancora attivo tra il sistema di terra e quello di bordo. Le altre due correnti di trasmissione (TX1, TX2) hanno lo stesso andamento dei casi di totale disaccoppiamento.

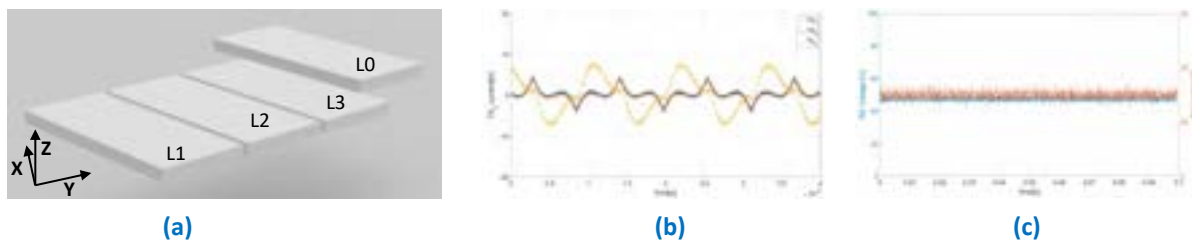


Figura 30: Scorrimento = 64cm: (a) geometria, (b) andamento delle correnti di trasmissione, (c) andamento della corrente e della tensione in ricezione

3.2.4 Valutazione della potenza e dell'efficienza di trasferimento in modalità di ricarica dinamica

Come già descritto nei paragrafi precedenti la bobina RX è stata montata su un carrello per simulare le condizioni di ricarica dinamica. In Figura 31a sono mostrati gli andamenti di tensione (blu) e corrente (giallo) al carico durante il movimento della bobina RX sulle bobine TX a una velocità pari a circa 0.15 m/s.

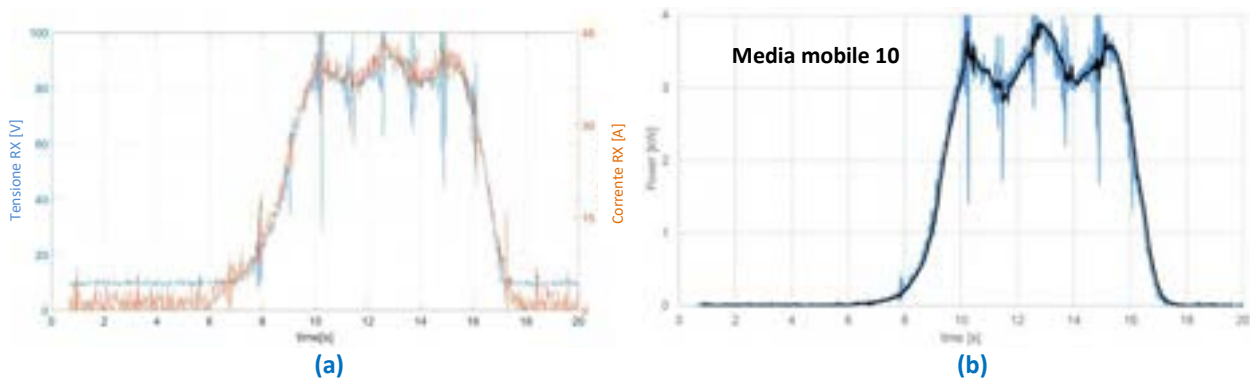


Figura 31: Sistema in movimento: (a) tensione e corrente al ricevitore durante il movimento, (b) andamento della potenza durante il movimento, il segnale è stato anche filtrato numericamente eseguendo una media mobile a 10 campioni

Si può vedere come durante la sovrapposizione della bobina RX sulle altre sia la tensione che la corrente rimangono costanti. L'andamento della potenza è mostrato in Figura 31b: in questo caso il segnale è stato filtrato offline numericamente con un algoritmo di media mobile a 10 campioni. E' evidente come, durante la sovrapposizione della bobine RX con quelle TX, la potenza rimane perlopiù costante e pari a 3.3 ± 0.4 kW.

3.2.5 Valutazione dell'efficienza di trasmissione senza contatto della potenza

Per valutare l'efficienza si è considerata la configurazione in Figura 32a in cui solo la bobina L2 è alimentata.

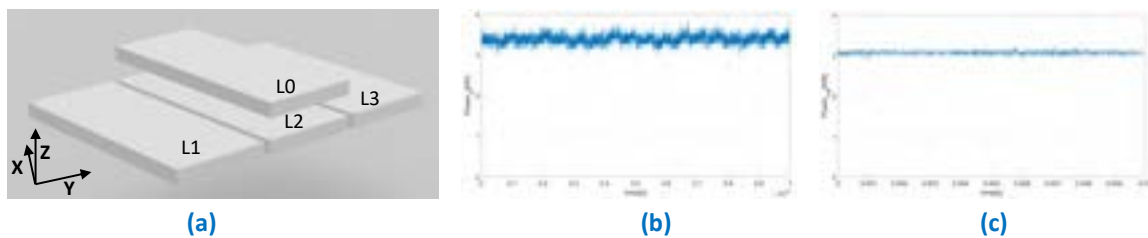


Figura 32: Valutazione dell'efficienza del sistema: (a) configurazione considerata, (b) andamento della potenza in trasmissione, (c) andamento della potenza in ricezione

Nelle Figure 32b e 32c sono mostrati i valori misurati della potenza trasferita dall'alimentatore (trasmissione) e della potenza al carico (ricezione) rispettivamente. L'efficienza di trasferimento è pari al 90.8%

L'efficienza rimane molto alta anche nel caso di parziale sovrapposizione di bobine mostrato in Figura 33a, in cui la bobina di RX (L0) è parzialmente sovrapposta alle bobine di TX, L2 e L3. Anche in questo caso è alimentata solo la bobina L2.

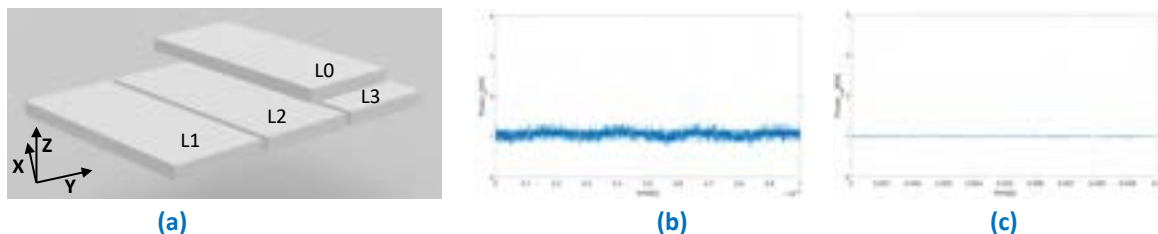


Figura 33: Valutazione dell'efficienza del sistema nel caso di bobine non accoppiate: (a) configurazione considerata, (b) andamento della potenza in trasmissione, (c) andamento della potenza in ricezione

Dalle Figure 33b e 33c si può vedere come la potenza trasferita sia inferiore in valore assoluto a causa della parziale sovrapposizione della bobina di RX con l'unica bobina di TX alimentata, ma l'efficienza, in questo caso è pari al 93.3%.

4 Conclusioni

In questo rapporto sono descritte le attività condotte nel corso dell'ultimo anno del progetto dedicato alla realizzazione di un prototipo per la ricarica dinamica senza contatto destinato alla ricarica delle batterie di una piccola city car realizzata in ENEA (UrBE). Nei primi due anni si sono identificate le specifiche di progetto, la geometria ottimale per le bobine utilizzate per il trasferimento di potenza senza contatto e una preliminare valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici dispersi da questo tipo di struttura. La realizzazione finale del prototipo prevedeva la realizzazione di quattro bobine uguali, a geometria DD, e operanti alla frequenza di 85 kHz: tre da mettere a terra affiancate e una da mettere a bordo dell'auto. Nel corso di questa annualità la realizzazione delle 4 bobine e delle unità per la conversione/trasmissione della potenza e per la sua ricezione e trasferimento alla batteria sono state affidate a due ditte artigiane. Il prototipo finale è stato provato su banco.

In una prima fase si sono valutate le matrici dell'impedenza dell'intero sistema al variare della posizione della bobina ricevente rispetto a quelle trasmettenti a terra, con la finalità di verificare che i parametri caratteristici del sistema di bobine fossero aderenti alle specifiche di progetto.

Il funzionamento delle unità di trasmissione e ricezione è stato verificato sperimentalmente attraverso misure delle correnti di alimentazione delle bobine di trasmissione e della corrente e della tensione ai capi della bobina ricevente. L'aderenza alle specifiche richieste sul prototipo completo è stata verificata su banco, attraverso delle misure delle correnti in trasmissione e della tensione e della corrente in ricezione. La frequenza di lavoro è pari a circa 88 kHz e la potenza trasferita dalle bobine a terra a quella a bordo è circa

pari a 3.3 ± 0.4 kW, misurata durante il movimento della bobina ricevente sulle trasmittenti. L'efficienza dell'intero sistema è superiore al 90%.

Alla fine di questo triennio si può quindi concludere che il prototipo per la ricarica dinamica senza contatto realizzato ha superato le previste prove da banco. Resta da testarne il suo funzionamento quando montato sull'automobile e di eseguire le valutazioni sperimentali ed eventualmente numeriche dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici dispersi in condizioni reali.

Ovviamente una ottimizzazione del prototipo stesso è auspicabile, soprattutto per cercare soluzioni che ne possano ridurre i costi di realizzazione.

5 Riferimenti bibliografici

1. <https://www.fabric-project.eu/>.
2. H.K. Dashora, G. Buja, M. Bertoluzzo, R. Pinto, V. Lopresto, "Analysis and Design of DD Coupler for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles", 2017, Journal of Electromagnetic Waves and Applications (TEWA), DOI: 10.1080/09205071.2017.1373036. Published online: 08 Sep 2017.
3. R. Pinto, V. Lopresto, A. Genovese, "A Numerical Study for the Design of a New DD coil Prototype for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles" Proceedings of 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), London, April 2018.
4. M. Budhia, J.T. Boys, G.A. Covic, and C.Y. Huang, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 1, pp. 318-328, 2013.
5. Impedance Measurement Handbook A guide to measurement technology and techniques, 6th Edition, Keysight Technology, <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>
6. G. Buja, M. Bertoluzzo, "Studio e progetto preliminare per un sistema di ricarica dinamica wireless", http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/mobilita-elettrica/rds_par2015-209.pdf