



Ricerca di Sistema elettrico

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

Giuseppe Buja, Manuele Bertoluzzo



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

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

Settembre 2016

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

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: Antonino Genovese, ENEA

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

Responsabile scientifico ENEA: Dr. Rosanna Pinto

Responsabile scientifico Prof. Giuseppe Buja (Università di Padova)

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
1.1 SISTEMI DI RICARICA DINAMICA WIRELESS .....	5
1.2 DESCRIZIONE DI UN SISTEMA DI RICARICA DINAMICA WIRELESS.....	7
1.3 PRESTAZIONI E SPECIFICHE.....	8
2 PROCEDURA DI PROGETTO DEL LAYOUT DEL TRACK.....	9
2.1 TENSIONE INDOTTA NEL PICKUP.....	9
2.2 ENERGIA TRASFERITA .....	11
3 ANALISI ORIENTATA AL PROGETTO DEI COMPONENTI DELLA SEZIONE TRASMITTENTE .....	13
3.1 BOBINE DD.....	13
3.2 CIRCUITO DI COMPENSAZIONE.....	16
3.3 INVERTITORE HF .....	18
4 PROGETTO PRELIMINARE DI UN SISTEMA DI RICARICA DINAMICA WIRELESS .....	20
4.1 CARATTERISTICHE DEL VEICOLO ELETTRICO SCELTO COME CASO DI STUDIO .....	20
4.2 DIMENSIONAMENTO DEGLI STADI DI POTENZA.....	22
4.3 PROGETTO DI MASSIMA DELLE BOBINE .....	23
5 CONCLUSIONI.....	26
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	27
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	27
8 APPENDICE .....	28

## Sommario

Gli apparati per il trasferimento wireless di energia elettrica realizzati con la tecnologia induttiva, in particolare quelle con livelli di potenza superiori al watt, hanno subito una rapida evoluzione tecnica negli ultimi anni; essa ha portato alla recente commercializzazione di caricabatteria che eseguono la ricarica wireless degli accumulatori di un veicolo elettrico parcheggiato (caricabatteria statici wireless). Per contro le attività di ricerca sui sistemi per la ricarica wireless di veicoli elettrici in movimento (sistemi di ricarica dinamica wireless) è iniziata solo di recente e i pochi prototipi finora costruiti sono in fase di riprogettazione alla luce dei test effettuati e degli sviluppi teorici in materia. Anche in questi sistemi il trasferimento dell'energia elettrica avviene con la tecnologia induttiva. Tuttavia, il loro progetto richiede l'elaborazione di nuove metodologie progettuali imposte dalle specificità applicative; le principali sono

- la presenza di un track trasmittente (invece di una bobina), dove per track si intende l'insieme delle bobine trasmettenti che, interrate lungo un tratto stradale, appartengono ad un sistema di ricarica funzionalmente autonomo,
- la presenza di un accoppiamento a geometria variabile tra le bobine del track e la bobina ricevente posta nel pianale del veicolo, comunemente detta pickup, a causa del moto del veicolo.

Il presente documento riferisce sul lavoro di ricerca svolto per pervenire al progetto preliminare di un sistema di ricarica dinamica wireless per il veicolo elettrico URBE scelto come caso di studio. Le attività intraprese hanno riguardato i seguenti argomenti:

- a) *Procedura di progetto del layout del track.* La procedura è stata suddivisa in due fasi. Nella prima fase sono state formulate le espressioni analitiche dell'energia trasferita al veicolo in funzione delle dimensioni delle bobine del track e della loro distanza. Nella seconda fase le espressioni formulate sono state applicate al dimensionamento del layout del track.
- b) *Analisi orientata al progetto dei componenti della sezione trasmittente.* Durante questa attività
  - sono state introdotte e studiate le caratteristiche induttive delle bobine di tipo DD che, per le ottime prestazioni di accoppiamento, rappresentano la soluzione più avanzata per l'implementazione dello stadio di trasferimento di energia elettrica nei sistemi di ricarica dinamica wireless;
  - è stato analizzato un circuito di compensazione delle bobine del track che semplifica notevolmente il controllo del sistema di ricarica dinamica wireless;
  - sono state esaminate alcune topologie per l'invertitore monofase ad alta frequenza che alimenta le bobine del track.
- c) *Progetto preliminare di un sistema di ricarica dinamica wireless.* Il progetto preliminare è stato eseguito con riferimento al veicolo scelto come caso di studio. Sulla base dei risultati ottenuti nei punti a) e b) sopra menzionati e delle specifiche prefissate per il layout, per le potenze di picco e per l'unità di controllo del sistema di ricarica dinamica wireless, sono stati dimensionati gli stadi di potenza sia della sezione trasmittente che della sezione ricevente ed è stato effettuato il progetto di massima delle bobine di accoppiamento.

Nel seguito del documento le attività sopra descritte sono riportate in modo dettagliato.

## 1 Introduzione

Gli apparati wireless per il trasferimento di energia elettrica con livelli significativi di potenza sono comunemente chiamati apparati wireless di potenza. Essi utilizzano la tecnologia induttiva e sono formati da tre stadi suddivisi in due sezioni, come esemplificato in Figura 1.1:

uno stadio di trasferimento dell'energia, formato da due bobine accoppiate chiamate trasmettente e ricevente;

un primo stadio di conversione di potenza -formato da un raddrizzatore della tensione di rete e da un invertitore ad alta frequenza (HF)-, che alimenta la bobina trasmettente tramite un circuito di compensazione della potenza reattiva assorbita dalla bobina; l'insieme dello stadio di conversione di potenza, del circuito di compensazione e della bobina trasmettente costituisce la sezione trasmittente,

un secondo stadio di conversione di potenza -formato da un raddrizzatore e, se necessario, da altri convertitori statici-, che preleva l'energia trasferita alla bobina ricevente tramite un circuito di compensazione della potenza reattiva assorbita dalla bobina e la riversa sul carico; l'insieme della bobina ricevente, del circuito di compensazione e dello stadio di conversione di potenza costituisce la sezione ricevente.

Il funzionamento degli apparati è presidiato da un'unità di controllo nella quale sono integrate reti di comunicazione pure wireless.

I caricabatteria wireless dei veicoli elettrici sono un esempio tipico di apparati wireless di potenza. In essi la bobina trasmettente è interrata mentre quella ricevente è posta nel pianale dei veicoli, e la ricarica è effettuata mentre il veicolo è fermo sopra la postazione dove è interrata la bobina trasmettente (ricarica statica wireless). In confronto con la ricarica tradizionale, la ricarica wireless risulta molto più semplice e sicura in quanto gli automobilisti non devono effettuare alcuna connessione elettrica tra l'"inlet" del veicolo e una presa di corrente esterna.

Di recente i caricabatteria statici wireless sono diventati un prodotto commerciale e, infatti, sono già disponibili alcuni modelli di piccola potenza (di alcuni kW). Peraltro il mercato sta già richiedendo caricabatteria wireless di potenza maggiore, il che ha dato avvio ad una serie di attività di ricerca tese a ideare schemi circuitali adeguati al trasferimento di decine di kW.

### 1.1 Sistemi di ricarica dinamica wireless

La ricarica statica wireless dei veicoli elettrici elimina indubbiamente la diffidenza che molti automobilisti hanno nel maneggiare apparecchiature elettriche di potenza. Tuttavia essa non è in grado di risolvere i due principali svantaggi che penalizzano i veicoli elettrici: la limitata autonomia e il lungo tempo di ricarica. Questi svantaggi sono invece superati mediante l'impiego dei cosiddetti sistemi di ricarica dinamica wireless (DWC) che trasferiscono l'energia elettrica a bordo di un veicolo mentre esso è in movimento.

L'implementazione di sistemi DWC richiede di attrezzare (o elettrificare, come si suole dire) un percorso stradale con più bobine trasmettenti, interrando sotto la superficie. Nella letteratura scientifica è invalso l'uso di chiamare track l'insieme delle bobine trasmettenti poste lungo un tratto stradale e appartenenti ad

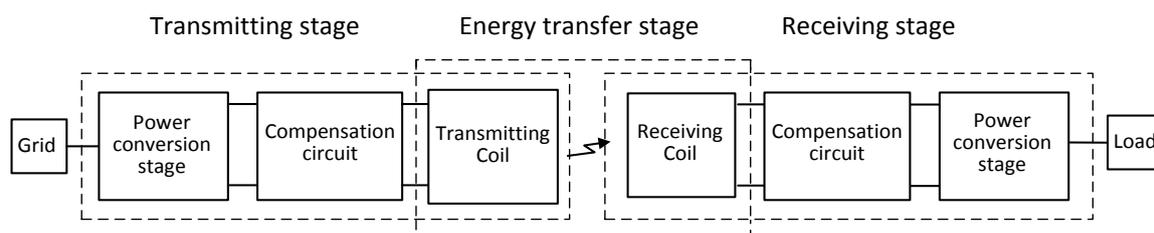


Figura 1.1. Apparato per il trasferimento wireless di energia con tecnologia induttiva.

un sistema DWC funzionalmente autonomo mentre la bobina ricevente posta a bordo del veicolo è chiamata pickup.

Esistono due topologie di track: distribuito e concentrato. Nei track distribuiti la lunghezza delle bobine (convenzionalmente la lunghezza è la dimensione lungo la direzione del moto del veicolo) è molto maggiore della lunghezza del pickup e quindi il pickup resta accoppiato con la medesima bobina del track per un intervallo relativamente lungo della corsa del veicolo, come esemplificato in Figura 1.2. Nei track concentrati la lunghezza delle bobine è comparabile con quella del pickup e il pickup resta accoppiato con una bobina del track per un intervallo relativamente breve della corsa del veicolo, come esemplificato in Figura 1.3.

In entrambi i tipi di track solo la bobina che risulta accoppiata con un pickup è alimentata al fine di ridurre i consumi e le emissioni elettromagnetiche non utili (i.e. quelle prodotte da campi magnetici che non si concatenano con il pickup), realizzando la cosiddetta segmentazione del track. Nel caso dei track distribuiti l'implementazione della segmentazione risulta più semplice in quanto il numero di bobine da alimentare è inferiore e, vista la loro lunghezza, una commutazione non del tutto tempestiva tra una bobina e quella successiva non ha conseguenze significative sull'ammontare dell'energia trasferita al veicolo. Per contro i consumi e l'entità dei campi elettromagnetici non utili sono maggiori. Nel caso dei track concentrati la situazione vantaggi-svantaggi si capovolge. In particolare, i consumi e l'entità dei campi elettromagnetici non utili sono molto ridotti perché l'attivazione delle singole bobine avviene solo al passaggio di un pickup (i.e. di un veicolo equipaggiato con pickup) sopra di esse. In Figura 1.3 questo risultato si ottiene mediante la chiusura/apertura di interruttori che collegano la linea di alimentazione HF alle bobine.

Lo schema di Figura 1.3 utilizza un unico stadio di conversione di potenza per l'alimentazione delle bobine di un track concentrato. Uno schema alternativo, mostrato in Figura 1.4, sostituisce gli interruttori con uno stadio di conversione di potenza. Rispetto allo schema di Figura 1.3, esso ha i seguenti meriti: a) uso di un cavo per bassa frequenza per portare la rete ai convertitori di potenza, b) impiego di convertitori di minore

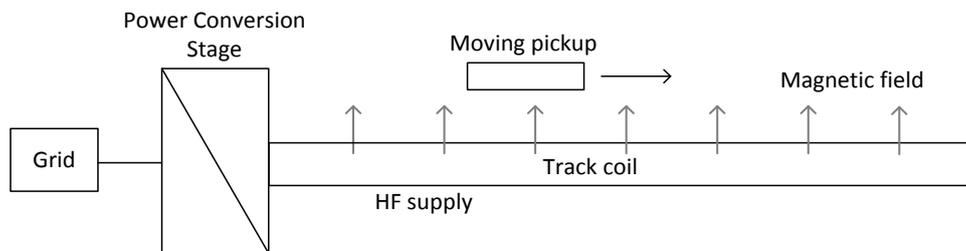


Figura 1.2. Sistema DWC con track distribuito.

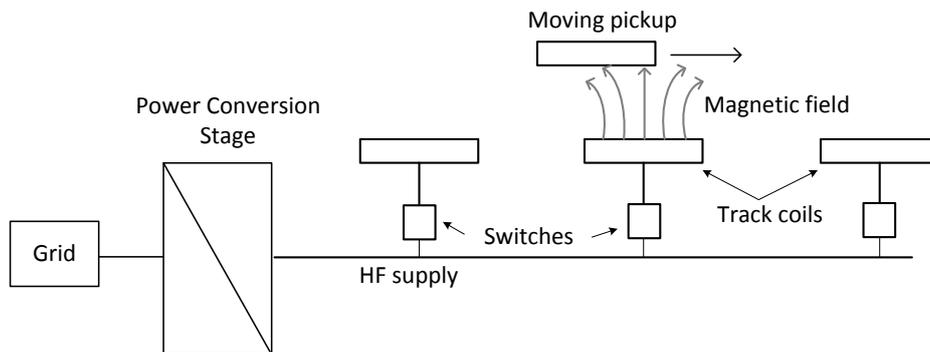
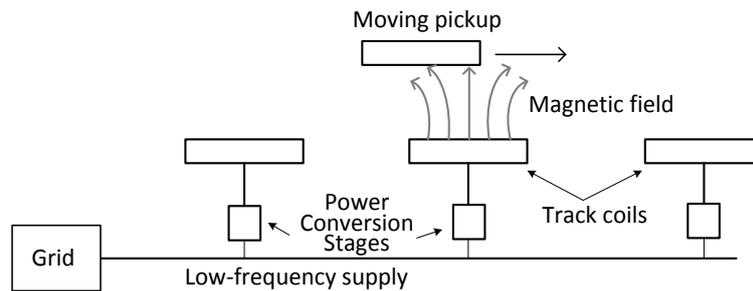


Figura 1.3. Sistema DWC con track concentrato (schema con unico stadio di conversione di potenza).



**Figura 1.4. Sistema DWC con track concentrato (schema con uno stadio di conversione di potenza per bobina).**

potenza, e c) maggiore tolleranza al guasto di un convertitore; per contro, lo schema richiede l'impiego di più convertitori di potenza.

Diversamente dai caricabatteria statici wireless, la potenza trasferita alla sezione ricevente non è costante ma varia lungo il percorso del veicolo. E' pertanto utile includere nella sezione ricevente un apparato di immagazzinamento dell'energia che la accumuli nei tratti nei quali la potenza trasferita è in eccesso rispetto a quella utilizzata e la rilasci nei tratti nei quali essa è in difetto o addirittura è nulla.

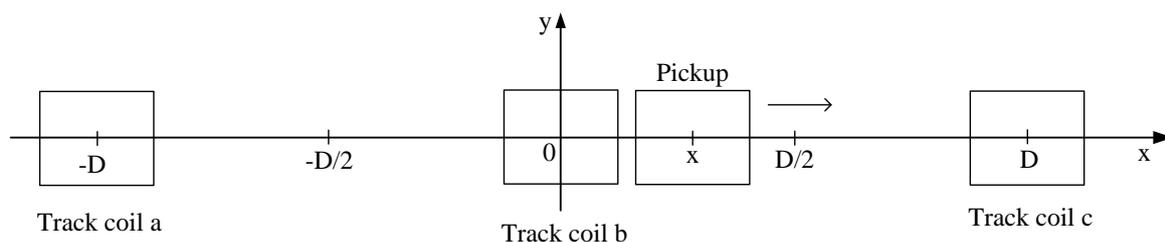
## 1.2 Descrizione di un sistema di ricarica dinamica wireless

La struttura di principio della sezione trasmittente di un sistema di ricarica dinamica wireless è stata disegnata in Figura 1.1. Nella Sezione 3 del rapporto essa sarà utilizzata per il progetto preliminare di una bobina trasmittente (e dell'associata bobina ricevente), del circuito di compensazione e del sistema di conversione di potenza.

Il layout di un track concentrato formato da tre bobine e del pickup che si muove sopra di esso è illustrato in Figura 1.5. La figura sarà utilizzata nella Sezione 2 del rapporto per sviluppare la procedura di progetto del layout. Tuttavia si ritiene utile premettere fin d'ora le seguenti considerazioni su di esso. Innanzitutto appare conveniente scegliere il layout in modo che solo le bobine più vicine al pickup producano un flusso magnetico che si concatena con esso. Pertanto, quando il pickup è nella posizione  $x$  di figura, esso è investito solo dal flusso prodotto dalle bobine  $b$  e  $c$  e non dalla bobina  $a$  (che, pertanto, può essere disalimentata). Si riconosce facilmente che questa ipotesi consente di ricondurre lo studio di un track con un numero qualunque di bobine a quello di un track con due bobine (le bobine  $b$  e  $c$  nel caso di Figura 1.5).

Per la sezione ricevente è stata scelta una struttura analoga a quella impiegata nei caricabatteria wireless statici in quanto essa consente di mantenere alta l'efficienza della sezione stessa. Pertanto il circuito di compensazione è costituito da un condensatore posto in serie alla bobina ricevente e risonante con essa alla frequenza di alimentazione. Condensatore e bobina sono indicati con  $L_p$  e  $C_p$  in Figura 1.6.

Di seguito si richiama brevemente il funzionamento della sezione ricevente dal momento esso si scosta solo marginalmente da quello della sezione ricevente di un caricabatteria wireless statico. La tensione indotta nel pickup è sinusoidale ed è rappresentata in Fig. 1.6 dal generatore di tensione  $v_p$ . Essa produce una corrente



**Figura 1.5. Layout del track.**

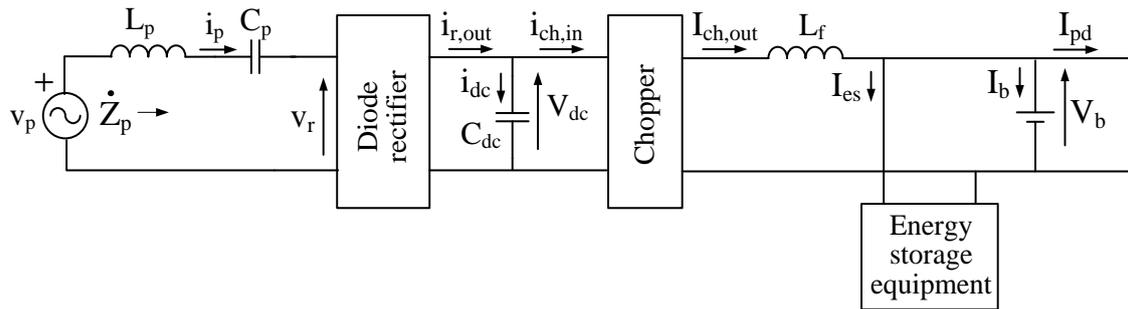


Figura 1.6. Schema circuitale della sezione ricevente di un sistema di ricarica dinamica wireless.

sinusoidale  $i_p$  che entra nel raddrizzatore a diodi. L'uscita del raddrizzatore è applicata al condensatore  $C_{dc}$  che, agendo da filtro, riduce il ripple della tensione  $V_{dc}$  ai suoi capi. Data l'elevata frequenza di alimentazione dei sistemi DWC, l'azione di filtraggio è eseguita con un condensatore di piccola capacità.

La tensione  $V_{dc}$  è applicata ad un chopper che, a sua volta, regola la tensione d'uscita al valore  $V_b$  della tensione dell'accumulatore del veicolo elettrico. L'induttanza di filtro  $L_f$  svolge il compito di ridurre il ripple della corrente  $i_{ch,out}$  all'uscita del chopper. La corrente  $i_{ch,out}$  si suddivide in tre componenti: la corrente  $I_b$  che ricarica gli accumulatori, la corrente  $I_{pd}$  che alimenta l'azionamento di propulsione (e gli ausiliari del veicolo) e la corrente  $I_{es}$  che entra nell'apparato di immagazzinamento dell'energia. Le due ultime componenti, che non sono presenti nei caricabatteria wireless statici, devono essere tenute in debito conto nel progetto dei sistemi DWC perché contribuiscono a determinare la corrente all'uscita del chopper.

### 1.3 Prestazioni e specifiche

Le prestazioni richieste ai sistemi DWC ricalcano in buona parte quelle per i caricabatteria wireless statici. Esse sono

- buona efficienza; per i sistemi DWC è importante che sia elevata soprattutto l'efficienza della sezione ricevente;
- fattore di dimensionamento dell'invertitore HF prossimo all'unità;
- emissioni elettromagnetiche inferiori ai limiti richiesti dalle normative che sono applicate a casistiche operative simili (in attesa del rilascio di norme specifiche).

In relazione al progetto preliminare del sistema DWC sono state poste le seguenti specifiche, dettate dall'esigenza di contemperare una sua realizzazione sperimentale -prevista come prosecuzione del presente lavoro di ricerca- con una contenuta complessità di implementazione:

- 1) track formato da tre bobine;
- 2) ridotti campi elettromagnetici non utili;
- 3) potenza di picco assorbita da rete non superiore ai 3 kW;
- 4) schema circuitale essenziale;
- 5) architettura semplificata dell'unità di controllo.

La specifica 2) è stata soddisfatta con la scelta di un track concentrato; la specifica 3) con un progetto appropriato dello stadio di accoppiamento; la specifica 4) con la scelta di un layout che non richiede l'utilizzo di un apparato di immagazzinamento dell'energia; la specifica 5) con l'utilizzo di un circuito di compensazione nella sezione trasmittente che consente di controllare separatamente la sezione ricevente da quella ricevente in modo da evitare l'inserzione di una rete wireless nella catena di controllo.

## 2 Procedura di progetto del layout del track

La procedura di progetto del layout del track di un sistema DWC inizia con l'analisi del trasferimento di energia elettrica dalle bobine del track al pickup [1]. Al fine di semplificare l'analisi, sono state poste le seguenti ipotesi di lavoro riguardanti la geometria e le dimensioni delle bobine disegnate in Figura 1.5:

- i) la distanza tra le bobine del track sia costante e pari a  $D$ . Come anticipato nella precedente Sezione,  $D$  è sufficientemente grande da poter supporre che il pickup concateni solo il flusso magnetico prodotto dalle bobine del track più vicine mentre risulta trascurabile il concatenamento con il flusso prodotto dalle altre bobine;
- ii) le bobine del track siano percorse da un uguale corrente sinusoidale  $i_t$  con ampiezza di picco  $I_t$  e pulsazione angolare  $\omega_s$  costanti;
- iii) il veicolo si muova lungo l'asse longitudinale delle bobine del track in modo che non ci sia alcun disallineamento (i.e. spostamento relativo lungo l'asse trasversale  $y$ ) tra le bobine del track e il pickup;
- iv) la velocità del veicolo  $U$  sia costante;
- v) la distanza percorsa dal veicolo durante un periodo della corrente di alimentazione sia molto minore di  $D$ ;
- vi) le bobine del track siano uguali e abbiano forma rettangolare con i lati orientati nelle direzioni  $x$  e  $y$ ; la lunghezza delle bobine è indicata con  $X_t$  e la loro larghezza con  $Y_t$ ;
- vii) il pickup sia uguale in forma e dimensioni alle bobine del track.

### 2.1 Tensione indotta nel pickup

Il trasferimento di energia elettrica dalle bobine del track al pickup è analizzato considerando il movimento del pickup nell'intervallo di spazio che va dalla posizione  $-D/2$  alla posizione  $D/2$ . Data la periodicità della geometria del track, i risultati dell'analisi possono essere estesi immediatamente anche agli altri intervalli.

A seguito delle ipotesi di lavoro i) e ii), il flusso  $\lambda_p$  concatenato con il pickup quando esso si trova nella posizione  $x$  di Figura 1.5 è espresso da

$$\lambda_p = [M_b(x) + M_c(x)]i_t \quad (2.1)$$

dove  $M_b(x)$  e  $M_c(x)$  sono le mutue induttanze tra il pickup e le bobine  $b$  e  $c$  del track in funzione della posizione  $x$  del pickup. La tensione indotta ai morsetti del pickup è espressa da

$$v_p = -\frac{d\lambda_p}{dt} = -[M_b(x) + M_c(x)]\frac{di_t}{dt} - \frac{d[M_b(x) + M_c(x)]}{dt}i_t \quad (2.2)$$

Il primo termine di  $v_p$  rende conto del contributo trasformatore alla tensione indotta; esso è presente anche nei caricabatteria wireless statici; il secondo termine rende conto del contributo mozionale ed è presente solamente nei sistemi DWC dato che ha origine dalla variazione delle mutue induttanze dovuta al movimento relativo tra il pickup e le bobine del track. Si può dimostrare che questo contributo è trascurabile rispetto a quello trasformatore e quindi nel seguito non verrà considerato [1]. Di conseguenza l'ampiezza della tensione indotta nel pickup risulta

$$V_p = \omega_s I_t [M_b(x) + M_c(x)] \quad (2.3)$$

Come si verificherà nella Sezione 3.1, la dipendenza delle mutue induttanze da  $x$  può essere rappresentata con buona approssimazione mediante funzioni lineari a tratti che sono nulle al di fuori di un intervallo di ampiezza  $2X_t$  centrato sulla relativa bobina e che ivi assumono il valore massimo  $M_0$ , come mostrato nelle

Figure 2.1 a) e b). Nel caso di Figura 2.1 a), è  $D > 2X_t$  e quindi la mutua induttanza  $M_c$  diventa maggiore di zero solo dopo che  $M_b$  è diventata nulla. La condizione che si ottiene è denominata ricopertura separata di flusso (SFC). In questa condizione il contributo delle due bobine al trasferimento di energia elettrica avviene in modo separato e indipendente l'uno dall'altro cosicché solo uno dei due termini nella (2.3) è diverso da zero e l'ipotesi di lavoro ii) non è necessaria. Nel caso di Figura 2.1 b), è  $D < 2X_t$ ; pertanto nell'intervallo  $[D-X_t, X_t]$  sia  $M_b$  che  $M_c$  sono non nulle e il flusso concatenato con il pickup è prodotto da entrambe le bobine b e c. La condizione che si ottiene è denominata ricopertura sovrapposta di flusso (OFC).

Applicando la (2.3) in condizione di SFC, l'ampiezza della tensione indotta nel pickup in funzione della sua posizione  $x$  è

$$\begin{cases} V_p(x) = 0, & x \in \left[-\frac{D}{2}, -X_t\right] \\ V_p(x) = \frac{V_0}{X_t}(x + X_t), & x \in [-X_t, 0] \end{cases} \quad (2.4)$$

avendo indicato con  $V_0$

$$V_0 = \omega_s I_t M_0 \quad (2.5)$$

La (2.4) può essere estesa facilmente al semintervallo  $[0, D/2]$  poiché  $V_p(x)$  ha simmetria pari rispetto all'origine ed è periodica con periodo  $D$ .

Applicando la (2.3) in condizione di OFC, l'ampiezza della tensione indotta nel pickup in funzione della sua posizione  $x$  è

$$\begin{cases} V_p(x) = \frac{V_0}{X_t}(2X_t - D), & x \in \left[-\frac{D}{2}, -D + X_t\right] \\ V_p(x) = \frac{V_0}{X_t}(x + X_t), & x \in [-D + X_t, 0] \end{cases} \quad (2.6)$$

Anche la (2.6) può essere estesa facilmente nel semintervallo  $[0, D/2]$  poiché gode delle stesse proprietà di simmetria e periodicità della (2.4).

In accordo con la Figura 1.6 la sezione ricevente include il condensatore  $C_p$  che risuona con  $L_p$  alla frequenza di alimentazione. Pertanto, trascurando la resistenza della bobina, la caduta di tensione sul ramo serie  $L_p$ - $C_p$  è nulla e  $v_p$  eguaglia la componente fondamentale della tensione  $v_r$  all'ingresso del raddrizzatore a diodi. Per massimizzare il trasferimento di energia, conviene imporre che il raddrizzatore a diodi conduca lungo tutto il periodo di  $v_p$ . Pertanto,  $v_r$  ha una forma d'onda quadra di ampiezza  $V_{dc}$  e l'ampiezza della sua componente fondamentale è data da

$$V_p(x) = \frac{4}{\pi} V_{dc} \quad (2.7)$$

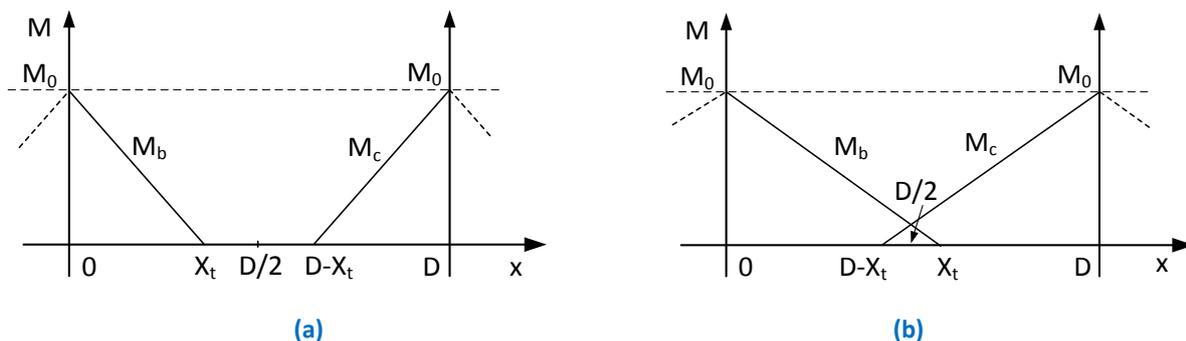


Figura 2.1. Mutua induttanza tra il pickup e le bobine b e c del track in SFC (a) e OFC (b).

dove  $4/\pi$  è la costante di proporzionalità che lega l'ampiezza di un'onda quadra a quella della sua componente fondamentale. La (2.7) mostra che, nelle condizioni fissate per il funzionamento del raddrizzatore a diodi, la tensione  $V_{dc}$  segue le variazioni dell'ampiezza di  $V_p$  con  $x$ .

La corrente  $i_p$  circolante nel pickup, a causa del filtraggio del ramo serie  $L_p$ - $C_p$ , ha una forma d'onda sinusoidale. Come ipotesi di lavoro si assuma che la sua ampiezza sia proporzionale a  $V_p$ ; vale pertanto la seguente relazione:

$$I_p(x) = \frac{V_p(x)}{R_p} \quad (2.8)$$

dove  $R_p$  è la resistenza vista dai terminali del pickup.

## 2.2 Energia trasferita

È ragionevole assumere che, lungo l'intervallo  $[-D/2, D/2]$ , la corrente di carica degli accumulatori sia mantenuta costante e che la corrente assorbita dall'azionamento di propulsione così come la tensione  $V_b$  degli accumulatori non varino apprezzabilmente. Uguagliando la potenza attiva all'uscita dal pickup (calcolata sul periodo di alimentazione  $T_s$ ) con la potenza media (calcolata su  $T_s$ ) all'uscita del chopper e trascurando le perdite nel sistema di conversione di potenza, si ottiene

$$\frac{1}{2} \frac{V_p^2(x)}{R_p} = P_b + P_{pd} + P_s(x) \quad (2.9)$$

dove  $P_b$ ,  $P_{pd}$  e  $P_s$  sono rispettivamente le potenze medie entranti negli accumulatori, nell'azionamento di propulsione e nell'apparato di immagazzinamento dell'energia. Si noti che, come conseguenza delle assunzioni fatte,  $P_s$  varia con  $x$ .

La potenza fornita dal pickup lungo l'intervallo  $[-D/2, D/2]$  dipende dalla posizione  $x$  del veicolo e, per una data posizione, assume valori diversi al variare del rapporto  $X_t/D$ . In Figura 2.2 sono riportati i profili di potenza ottenuti dalla (2.9) utilizzando i valori di 1, 3/4, 1/2 e 1/4 per il rapporto  $X_t/D$ . Per facilitare la lettura del grafico, la potenza trasferita è stata normalizzata rispetto a

$$P_0 = \frac{1}{2} \frac{V_p^2(0)}{R_p} \quad (2.10)$$

La Figura 2.2 mostra che, nell'intervallo  $[-D/2, D/2]$ ,

- a parità di  $x/D$ , la potenza trasferita cresce all'aumentare del rapporto  $X_t/D$ ;
- il trasferimento di potenza diventa continuo nel passaggio dalle condizioni di SFC a quelle di OFC, i.e. per  $X_t > D/2$ ;

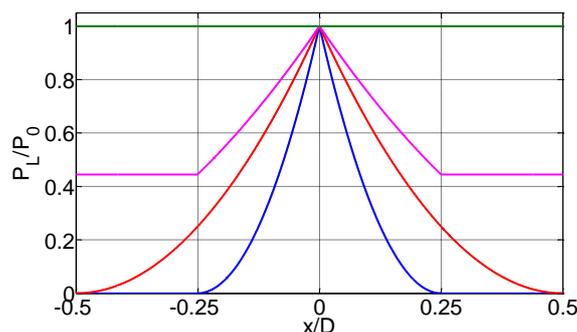


Figura 2.2. Potenza trasferita vs.  $x/D$  per  $X_t/D=1$  (verde), 3/4 (viola), 1/2 (rosso), 1/4 (blu).

- l'escursione della potenza trasferita diminuisce all'aumentare di  $X_t/D$  fino ad annullarsi per  $X_t/D=1$ , i.e. quando le bobine sono installate l'una a fianco all'altra.

Per la (2.9), l'energia trasferita al veicolo mentre esso si muove nell'intervallo  $[-D/2, D/2]$  è espressa dalla

$$E = \frac{1}{U} \frac{1}{2R_p} \int_{-D/2}^{D/2} V_p^2(x) dx \quad (2.11)$$

dove  $U$  è la velocità del veicolo, considerata costante in accordo con l'ipotesi di lavoro iv). In condizioni di SFC la tensione indotta assume l'espressione (2.4) che, sostituita nella (2.11) porta alla

$$E_{SFC} = \frac{1}{3} E_0 X_t \quad (2.12)$$

avendo indicato con  $E_0$

$$E_0 = \frac{1}{U} \frac{V_0^2}{R_p} \quad (2.13)$$

La (2.12) evidenzia la convenienza di utilizzare bobine con un'elevata dimensione longitudinale  $X_t$  al fine di trasferire una maggiore energia al veicolo. La relazione (2.12) è valida se  $X_t < D/2$ ; in caso contrario il sistema DWC opera in condizione di OFC e, nella (2.11), la tensione indotta è data dalla (2.6). L'espressione dell'energia trasferita al veicolo diventa

$$E_{OFC} = \frac{1}{3} E_0 X_t \left[ 5 + 3 \left( \frac{D}{X_t} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{D}{X_t} \right)^3 - 6 \left( \frac{D}{X_t} \right) \right] \quad (2.14)$$

L'energia trasferita, normalizzata rispetto a  $E_0$ , è tracciata in funzione del rapporto  $X_t/D$  in Figura 2.3. La figura evidenzia che

- l'energia trasferita cresce all'aumentare di  $X_t/D$  anche in condizione di OFC,
- la pendenza con la quale l'energia trasferita è maggiore in condizione di OFC che in quella di SFC,
- la crescita è più sensibile all'aumentare di  $X_t/D$ .

Dai risultati delle Figure 2.2 e 2.3 emerge come la scelta  $X_t/D=1$  consenta di

- evitare l'impiego di un apparato per l'immagazzinamento dell'energia,
- rendere massima l'energia trasferita,
- di eliminare le escursioni della potenza assorbita da rete (che, a parte le perdite, è uguale a quella fornita dal pickup) lungo l'intervallo  $[-D/2, D/2]$ .

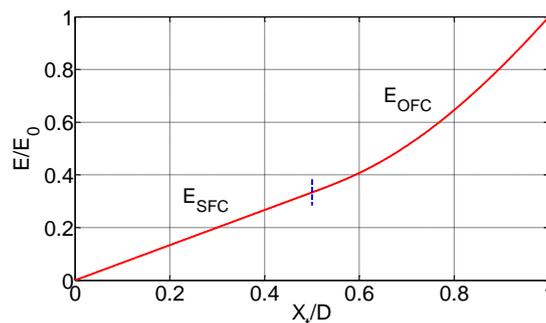


Figura 2.3. Energia trasferita vs.  $X_t/D$ .

Commento Come espresso dalle (2.4) e (2.6), l'ampiezza di tensione  $V_p$  varia con  $x$  e, a seconda della condizione di ricopertura, essa può assumere valori piccoli se non nulli. Si può dimostrare che l'ipotesi di lavoro (2.8) e il dover mantenere la tensione d'uscita del chopper alla tensione degli accumulatori  $V_b$  richiedano o di disattivare il chopper (se questo è di tipo buck) quando la tensione d'ingresso scende sotto al valore  $V_b$  o di utilizzare un chopper di tipo buck-boost che, peraltro, non potrebbe funzionare con tensioni di ingresso inferiori ad una frazione di  $V_b$ . Pertanto la scelta  $X_i/D=1$  consente anche di semplificare la realizzazione del chopper che potrà essere di tipo buck.

### 3 Analisi orientata al progetto dei componenti della sezione trasmittente

Come è stato descritto nella Sezione 1, i componenti della sezione trasmittente di un sistema per la ricarica wireless sono la bobina trasmittente, il circuito di compensazione e l'invertitore HF. In questa sezione sono riportate le attività svolte per l'analisi orientata al progetto di questi componenti per un sistema DWC. L'analisi della bobina del track è svolta congiuntamente con il pickup.

#### 3.1 Bobine DD

Le bobine impiegate nei sistemi per la ricarica wireless, sia essa statica o dinamica, sono classificate in due famiglie. Si consideri una bobina e le linee di campo del vettore induzione magnetica prodotte dalla bobina e orientate nel verso del vettore. Una bobina nella quale la componente ortogonale delle linee di campo del vettore induzione magnetica concatenate con la bobina ha ugual verso su tutta la superficie della bobina stessa è detta non polarizzata mentre una bobina nella quale tale componente ha entrambe i versi, ancorché in zone diverse della sua superficie, è detta polarizzata. Le bobine polarizzate sono preferite nelle applicazioni che utilizzano il fenomeno dell'accoppiamento perché, a parità di altre condizioni, il flusso prodotto da una bobina e concatenato con l'altra è maggiore anche quando le due bobine non sono allineate. Tra la famiglia di bobine polarizzate, quelle di tipo DD esemplificate in Figura 3.1 sono le più convenienti nelle applicazioni per la ricarica dinamica wireless [2]. Si noti che le due bobine in Figura 3.1 sono uguali, in accordo con l'ipotesi di lavoro vi) della Sezione 2.

Ogni bobina di tipo DD è formata da due semi-bobine rettangolari affacciate lungo uno dei lati, collegate in serie tra loro e avvolte in modo da generare linee di campo che hanno direzioni opposte sulla superficie delle due semi-bobine, cosicché le linee di campo uscenti da una semi-bobina risultano entranti nell'altra come illustrato nella Figura 3.2.

Al fine di analizzare le proprietà delle bobine DD sono state considerate diverse coppie di bobine formate da una sola spira e con nuclei di ferrite piani aventi le dimensioni delle bobine, l'uno posto sopra al pickup e

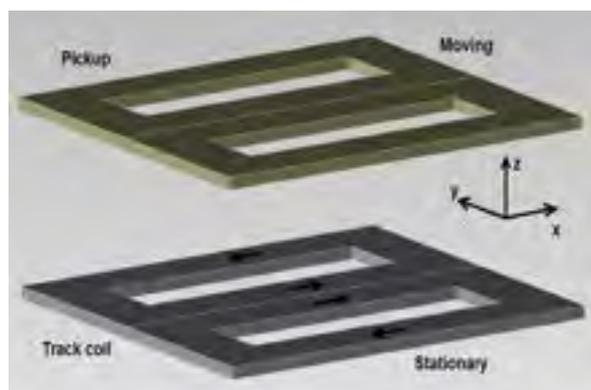


Figura 3.1. Bobine DD.

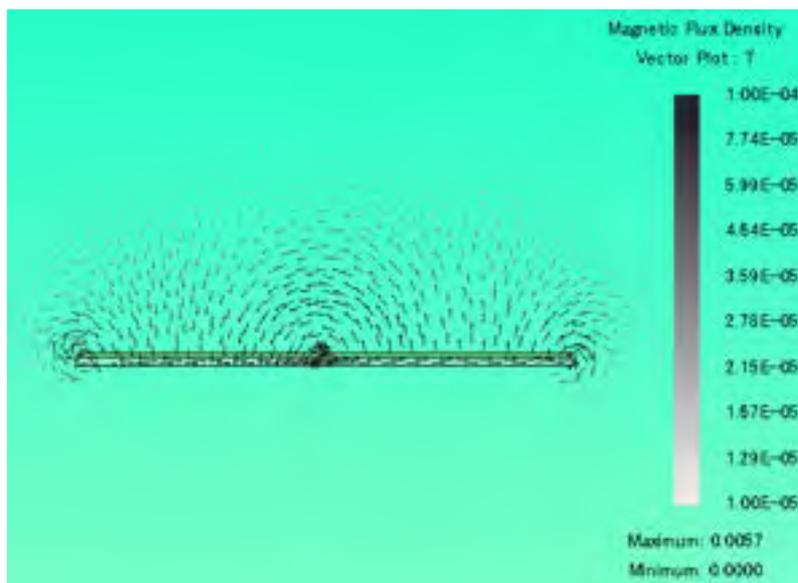


Figura 3.2. Linee di campo del vettore induzione magnetica generate da una bobina di tipo DD.

Tabella 3.1. Dimensioni e parametri induttivi delle bobine.

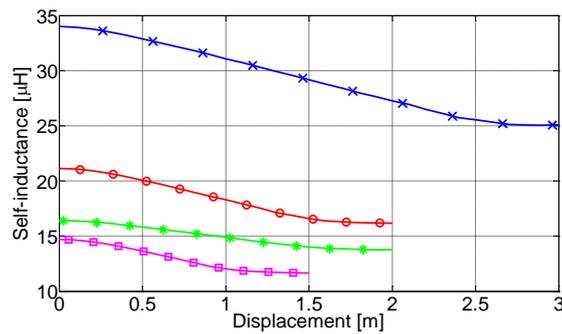
Numero indice della coppia di bobine	$X_t$ [m]	$Y_t$ [m]	$M_0$ [ $\mu$ H]	$L_0$ [ $\mu$ H]	$k$
#1	2.5	1.5	16.6	34.0	0.487
#2	1.5	1.5	9.7	21.1	0.460
#3	1.0	1.5	6.3	17.7	0.428
#4	1.5	1.0	5.8	16.4	0.357

l'altro sotto la bobina del track. Per ogni coppia di bobine è stata effettuata un'analisi FEM volta a determinarne i parametri induttivi (autoinduttanza e mutua induttanza) in condizioni di sovrapposizione. Le condizioni di sovrapposizione si verificano quando la posizione relativa del pickup rispetto alla bobina del track è zero e le bobine non sono disallineate.

I risultati dell'analisi sono riportati nella Tabella 3.1, dove  $X_t$  è la lunghezza delle bobine,  $Y_t$  è la loro larghezza, il pedice 0 indica la condizione di sovrapposizione e le bobine sono poste ad una distanza di 17 cm lungo l'asse verticale z. Dall'esame dei dati di tabella emerge che i parametri induttivi crescono con la lunghezza delle bobine e che sono maggiormente influenzati dalla loro larghezza piuttosto che dalla loro lunghezza. Ad esempio, si prenda come riferimento la coppia di bobine #2: la coppia di bobine #3 ha una lunghezza minore mentre la coppia di bobine #4 ha una larghezza minore. A fronte di queste diverse dimensioni, i parametri induttivi della coppia di bobine #3 cambiano meno di quelli della coppia di bobine #4.

E' stata poi analizzata la legge di variazione dei parametri induttivi in funzione della posizione relativa x del pickup. I risultati ottenuti per l'autoinduttanza sono riportati in Figura 3.3 (linea blu con le crocette per la coppia #1, linea rossa con i pallini per la coppia di bobine #2, linea verde con gli asterischi per la coppia di bobine #3 e linea viola con i quadrati per la coppia di bobine #4) e rivelano che l'autoinduttanza diminuisce man mano che il pickup si allontana dalla bobina del track. Questo fenomeno è dovuto alla presenza dei nuclei di ferrite che aumentano la riluttanza del circuito magnetico delle due bobine quando il pickup non è sovrapposto alla bobina del track.

I risultati ottenuti per la mutua induttanza sono riportati in Figura 3.4 con le stesse modalità grafiche usate



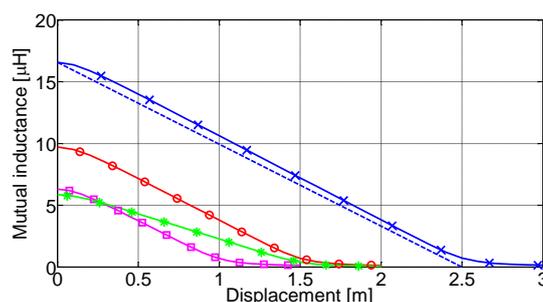
**Figura 3.3. Autoinduttanza delle bobine DD in funzione della posizione del pickup.**

per le autoinduttanze. Da essi emerge che la mutua induttanza ha un andamento praticamente lineare in funzione della posizione, come anticipato nella Sezione 2. Essa assume il massimo valore  $M_0$  quando le bobine sono sovrapposte per poi diminuire a valori molto piccoli quando la posizione relativa del pickup è pari alla lunghezza delle bobine. È interessante notare come questa caratteristica sia poco influenzata dalla larghezza della bobina; infatti la mutua induttanza della coppia di bobine #2 si azzerava quasi per la stessa posizione relativa del pickup per la quale essa si azzerava per la coppia di bobine #4 anche se quest'ultima coppia ha una larghezza più piccola del 30% rispetto all'altra.

Per la coppia di bobine #1 è anche riportata in Figura 3.4 con linea tratteggiata la retta con la quale è stata modellata la mutua induttanza negli sviluppi matematici effettuati nella Sezione 2. Si noti che l'approssimazione è conservativa in quanto la mutua induttanza calcolata tramite FEM risulta (leggermente) superiore di quella ottenuta usando la retta approssimante.

Quando il veicolo non procede esattamente sulla mezzera del track esiste un disallineamento del pickup. Il suo effetto sulla mutua induttanza è stato studiato per le quattro coppie di bobine considerate in Tabella 3.1 ottenendo risultati simili. In Figura 3.5 è riportato con linea blu tratteggiata l'andamento del rapporto  $M_{DD}^2/M_0^2$  in funzione del disallineamento nella posizione  $x=0$ , dove  $M_{DD}$  è la mutua induttanza ottenuta in condizione di disallineamento e  $M_0$  è la mutua induttanza senza disallineamento. È stato scelto il rapporto  $M_{DD}^2/M_0^2$  come indice di prestazione delle caratteristiche di accoppiamento delle due bobine perché, per le (2.9) e (2.10), esso è proporzionale al rapporto tra la potenza trasferita al veicolo in condizione di disallineamento e quella massima. L'asse delle ascisse di Figura 3.5 è stato scalato rispetto alla larghezza delle bobine cosicché i grafici risultano validi anche per bobine con dimensioni diverse. L'analisi del risultato rivela una peculiarità delle bobine DD: esiste un valore del disallineamento, chiamato "punto di zero", in corrispondenza del quale  $M_{DD}$  è zero anche se le bobine sono ancora parzialmente affacciate. Questo risultato si spiega con il fatto che la somma delle tensioni indotte nelle due semi-bobine del pickup è nulla, anche se la tensione indotta in ognuna di esse è diversa da zero, in quanto hanno segno opposto.

Sono state studiate diverse soluzioni per eliminare o almeno ridurre gli effetti del "punto di zero". Una di esse consiste nell'aggiungere al pickup una bobina, chiamata Q (Quadrature coil), anch'essa collegata ad un proprio circuito di compensazione e ad un proprio raddrizzatore a diodi, e nel sommare la potenza trasferita alla bobina Q a quella trasferita alla bobina DD. Disponendo la bobina Q sul pickup come mostrato in Figura



**Figura 3.4. Mutua induttanza tra due bobine DD in funzione della posizione del pickup.**

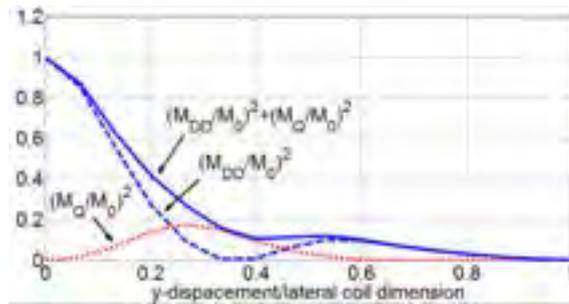


Figura 3.5. Mutua induttanza delle bobine DD in funzione del disallineamento laterale.

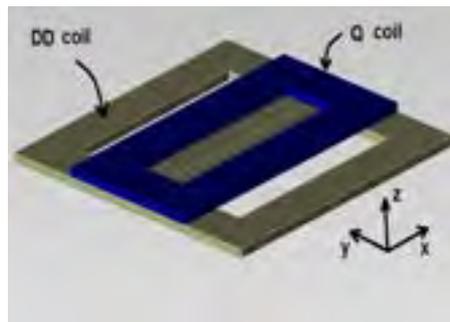


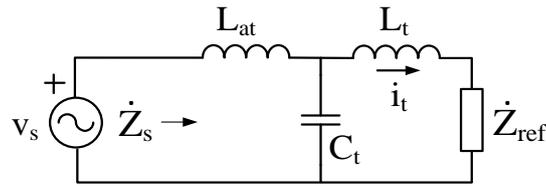
Figura 3.6. Bobina DD con bobina Q.

3.6, il rapporto  $M_Q^2/M_0^2$  -che corrisponde al rapporto tra la potenza trasferita alla bobina Q e quella massima trasferita alla bobina DD- non è nullo nel “punto di zero”, come illustrato dalla curva rossa tratteggiata di Figura 3.5, ma risulta quasi uguale al valore massimo del rapporto  $M_Q^2/M_0^2$  perché la bobina Q è allineata verticalmente con una semi-bobina del track nel “punto di zero”. La somma delle potenze trasferite alla bobina DD e alla bobina Q del pickup, rapportata alla potenza massima, è rappresentata dalla linea blu continua di Figura 3.5. Si riconosce immediatamente come l’utilizzo della bobina Q riduca sensibilmente gli effetti del “punto di zero” rendendo possibile trasferire potenza al pickup anche in presenza di disallineamento.

### 3.2 Circuito di compensazione

Il circuito di compensazione usato nella sezione trasmittente di un caricabatteria wireless statico è formato da un condensatore, solitamente collegato in serie alla bobina e risonante con essa alla frequenza di alimentazione. Nei sistemi DWC si utilizzano circuiti di compensazione con più elementi reattivi per conseguire, oltre alla compensazione della potenza reattiva assorbita dalla bobina del track, anche prestazioni aggiuntive. Come è noto, la summenzionata compensazione consente di minimizzare il dimensionamento degli interruttori statici dell’invertitore HF di alimentazione e di ridurre le perdite nelle resistenze parassite aumentando l’efficienza del sistema.

Un circuito di compensazione con più elementi, detto LCL, è riportato in Figura 3.7 ed è ottenuto con l’inserzione di un condensatore  $C_t$  e di un induttore addizionale  $L_{at}$  tra l’alimentazione del track, rappresentata dalla sorgente di tensione  $v_s$ , e la bobina del track  $L_t$  [3]. L’induttore  $L_{at}$  ha induttanza uguale a  $L_t$  ed il condensatore  $C_t$  risona con  $L_t$  (e quindi con  $L_{at}$ ) alla frequenza di alimentazione. L’alimentazione del track è fornita dall’invertitore di tensione HF. Il circuito LCL agisce da filtro delle armoniche di tensione all’uscita dell’invertitore; di conseguenza le correnti nel circuito sono pressoché sinusoidali e la tensione  $v_s$  può essere approssimata con una sinusoide di ampiezza pari alla sua componente fondamentale. Il circuito di Figura 3.7 include anche l’impedenza  $Z_{ref}$ ; essa è uguale all’impedenza  $Z_p$  del pickup (e degli elementi circuitali collegati in cascata ad esso) riferita alla bobina del track, ed è espressa da



**Figura 3.7. Circuito di compensazione LCL.**

$$\dot{Z}_{ref} = \frac{\omega_s^2 M_0^2}{\dot{Z}_p} \quad (3.1)$$

Come si è menzionato nella Sezione 1.2, il circuito di compensazione della sezione ricevente è un condensatore posto in serie al pickup e risonante con esso. Pertanto,  $\dot{Z}_p$  è puramente resistiva e  $\dot{Z}_{ref}$  è uguale a

$$\dot{Z}_{ref} = \frac{\omega_s^2 M_0^2}{R_p} \quad (3.2)$$

Trascurando le resistenze parassite degli elementi reattivi, l'impedenza d'ingresso del circuito di Figura 3.7 è espressa da

$$\dot{Z}_s = j\omega_s L_{at} + \frac{1}{j\omega_s C_t + \frac{1}{j\omega_s L_t + \dot{Z}_{ref}}} \quad (3.3)$$

Sostituendo la (3.2) nella (3.3) si perviene alla

$$\dot{Z}_s = \frac{L_t^2}{M_0^2} R_p \quad (3.4)$$

La (3.4) mostra che anche l'impedenza di ingresso del circuito di compensazione LCL è puramente resistiva cosicché la corrente fornita dalla sorgente di tensione è in fase con la tensione generata. La corrente che scorre nella bobina del track è espressa da

$$\bar{I}_t = \frac{\bar{V}_s}{\dot{Z}_s} \frac{\frac{1}{j\omega_s C_t}}{\frac{1}{j\omega_s C_t} + j\omega_s L_t + \dot{Z}_{ref}} = \frac{\bar{V}_s}{j\omega_s L_t} \quad (3.5)$$

La (3.5) mostra che l'ampiezza della corrente  $i_t$  è proporzionale all'ampiezza della tensione di alimentazione indipendentemente dalla presenza o meno di un pickup accoppiato con la bobina del track. Questa peculiarità costituisce la prestazione aggiuntiva offerta dal circuito di compensazione LCL; essa consente di tenere separato il controllo della corrente nella bobina del track dal controllo della corrente del pickup, rendendo superflua ogni trasmissione di segnali di retroazione dalla sezione ricevente alla sezione trasmittente. In caso contrario, la trasmissione di questi segnali dovrebbe avvenire per mezzo di una rete di comunicazione wireless, non solo rendendo più complicata la realizzazione del controllo del sistema DWC ma anche limitandone la banda operativa.

Il circuito di compensazione LCL semplifica anche l'espressione della tensione  $V_p$  indotta nel pickup. Infatti, sostituendo la (3.5) nell'espressione di  $V_p$ , qui riportata,

$$\bar{V}_p = j\omega_s M(x) \bar{I}_t \quad (3.6)$$

si ottiene

$$\bar{V}_p = \frac{M(x)}{L_t} \bar{V}_s \quad (3.7)$$

Poiché  $L_t$  è uguale a  $L_p$ , la (3.7) diventa

$$\bar{V}_p = k(x) \bar{V}_s \quad (3.8)$$

dove  $k(x)$  è il coefficiente di accoppiamento delle bobine; esso varia con  $x$  con la stessa legge con la quale varia  $M$ .

### 3.3 Invertitore HF

La topologia più utilizzata per l’invertitore HF che alimenta la sezione trasmittente di un sistema di ricarica wireless è un ponte monofase a due livelli, come illustrato in Fig. 3.8. L’invertitore è alimentato da una tensione continua  $V_{CC}$  e fornisce ai morsetti A e B di uscita una tensione  $v_s$  con forma d’onda quadra o quasi quadra. Nella Figura 3.8 è stato evidenziato il punto N di mezzo della tensione continua rispetto al quale sono definite le tensioni di linea  $v_{AN}$  e  $v_{BN}$  dell’invertitore.

L’invertitore è comandato chiudendo alternativamente le coppie di interruttori statici ( $T_1, T_4$ ) e ( $T_3, T_2$ ) con duty-cycle 50%. Le tensioni  $v_{AN}$  e  $v_{BN}$  generate sono onde quadre che variano tra due livelli ( $+V_{CC}/2$  e  $-V_{CC}/2$ ), da cui deriva la dizione di invertitore a due livelli data alla topologia in Figura 3.8, mentre la tensione di uscita  $v_s$  è data dalla loro differenza. Quando i comandi delle coppie di interruttori statici ( $T_1, T_4$ ) e ( $T_3, T_2$ ) sono ritardati di  $180^\circ$  (qui e in seguito la variabile rappresentata sull’asse delle ascisse è la fase angolare  $\Theta$ ), le tensioni  $v_{AN}$  e  $v_{BN}$  hanno segno opposto per ogni valore di  $\Theta$  e  $v_s$  è un’onda quadra di ampiezza  $V_{CC}$ . La sua componente fondamentale ha ampiezza a  $(4/\pi)V_{CC}$ .

Il controllo di un sistema DWC è eseguito variando la componente fondamentale della tensione all’uscita dell’invertitore. Il metodo più diretto consisterebbe nel variare la tensione  $V_{CC}$  ma esso è raramente utilizzato in quanto richiederebbe un’azione di controllo della tensione all’uscita del raddrizzatore interposto tra la rete e l’invertitore. Si preferisce piuttosto agire direttamente sul ponte inserendo un angolo di ritardo  $\alpha$  tra i comandi dei due rami del ponte. In questo modo si ottengono degli intervalli angolari nei quali  $v_{AN}$  e  $v_{BN}$  hanno lo stesso livello e l’ampiezza di  $v_s$  risulta nulla. Variando  $\alpha$  da  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , l’ampiezza  $V_{s,1}$  della componente fondamentale di  $v_s$  passa da zero al valore massimo di  $4/\pi V_{CC}$ . L’espressione di  $V_{s,1}$  in funzione di  $\alpha$  è

$$V_{s,1} = \frac{4}{\pi} V_{CC} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.9)$$

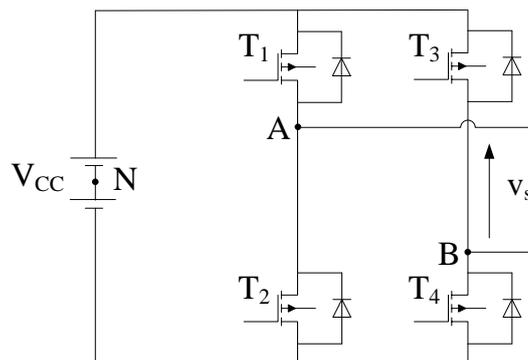
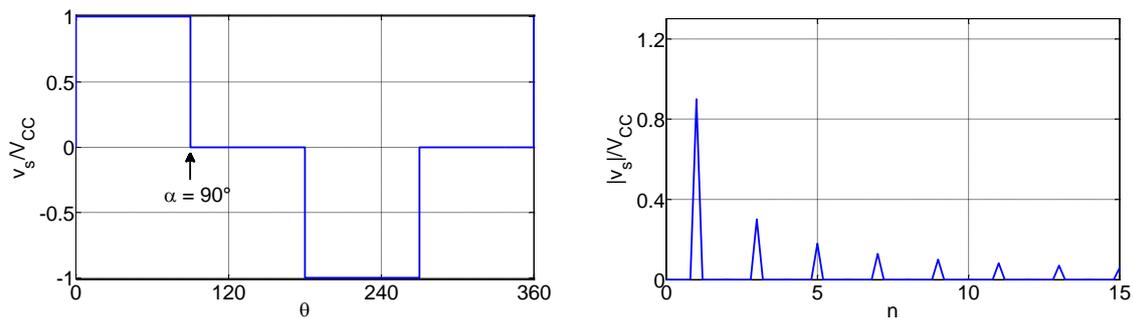


Figura 3.8. Invertitore a ponte a due livelli.



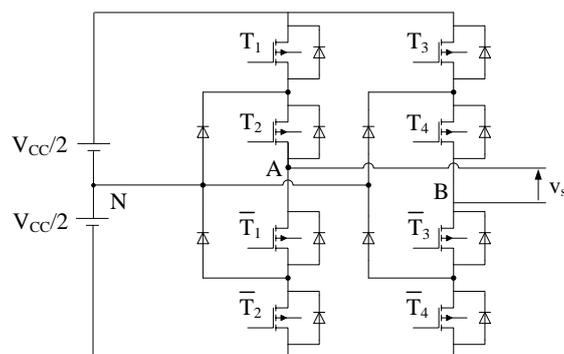
**Figura 3.9. Forma d'onda e spettro della tensione  $v_s$  generata dall'invertitore monofase a ponte a due livelli con  $\alpha=90^\circ$ .**

A titolo di esempio, nella parte sinistra di Figura 3.9 è riportata la tensione  $v_s$  all'uscita dell'invertitore in funzione dell'ascissa angolare  $\theta$  quando  $\alpha$  è uguale a  $90^\circ$ . Dal momento che  $v_s$  è ottenuta per differenza tra due onde quadre, essa ha uno spettro che, in generale, comprende anche tutte le armoniche dispari, come riportato nella parte destra della Figura 3.9.

Le armoniche della tensione  $v_s$  all'uscita dell'invertitore producono armoniche di corrente che, pur piccole perché filtrate dal circuito di compensazione, possono disturbare le apparecchiature poste nelle vicinanze. Per eliminare le armoniche della tensione  $v_s$  si possono usare gli invertitori multilivello. Si dimostra che ogni livello aggiunto ai due livelli dell'invertitore in Figura 3.8 consente di eliminare un'armonica di tensione. A titolo di esempio si desidera eliminare la terza armonica che, essendo di ampiezza più elevata e di ordine minore, produce l'armonica di corrente di maggior ampiezza.

La topologia di un invertitore monofase a ponte a tre livelli è disegnata in Figura 3.10. Essa è comunemente chiamata topologia Neutral Point Clamped (NPC). Gli interruttori statici inferiori dei due rami ( $\bar{T}_1, \bar{T}_2, \bar{T}_3$  e  $\bar{T}_4$ ) sono comandati in maniera opposta rispetto a quelli superiori ( $T_1, T_2, T_3$  e  $T_4$ ) per evitare che l'alimentazione in continua o i due condensatori siano cortocircuitati. In funzione dello stato di apertura o chiusura degli interruttori le tensioni di linea  $v_{AN}$  e  $v_{BN}$  possono ora assumere tre valori:  $V_{CC}/2, 0$  e  $-V_{CC}/2$ . Per esempio, con riferimento al punto A, se  $T_1$  e  $T_2$  sono entrambi chiusi la tensione  $v_{AN}$  è pari a  $V_{CC}/2$ ; se  $T_1$  e  $T_2$  sono entrambi aperti, con  $\bar{T}_1$  e  $\bar{T}_2$  chiusi, la tensione  $v_{AN}$  è pari a  $-V_{CC}/2$ ; se invece  $T_1$  è aperto e  $T_2$  è chiuso, la tensione  $v_{AN}$  è nulla. La combinazione con  $T_1$  chiuso e  $T_2$  aperto non è usata in quanto lascerebbe il carico isolato.

Come nell'invertitore a due livelli, la tensione di uscita  $v_s$  è data dalla differenza delle tensioni  $v_{AN}$  e  $v_{BN}$ . Pertanto, se gli interruttori statici sono controllati in modo che le tensioni di linea siano onde quadre ritardate dell'angolo  $\alpha$ , la tensione di uscita ha la stessa forma d'onda che aveva nell'invertitore a due livelli. Nell'invertitore a tre livelli è però possibile utilizzare la possibilità di assegnare anche il valore nullo alle



**Figura 3.10. Invertitore a ponte a tre livelli.**

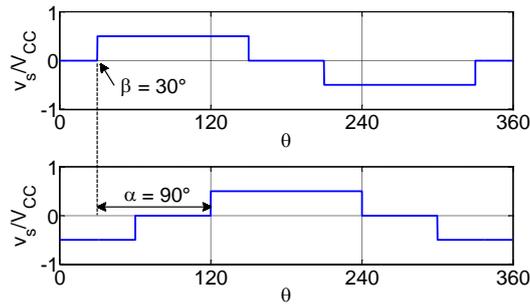


Figura 3.11. Tensioni  $v_{AN}$  (curva superiore) e  $v_{BN}$  (curva inferiore) generate dell’invertitore a tre livelli.

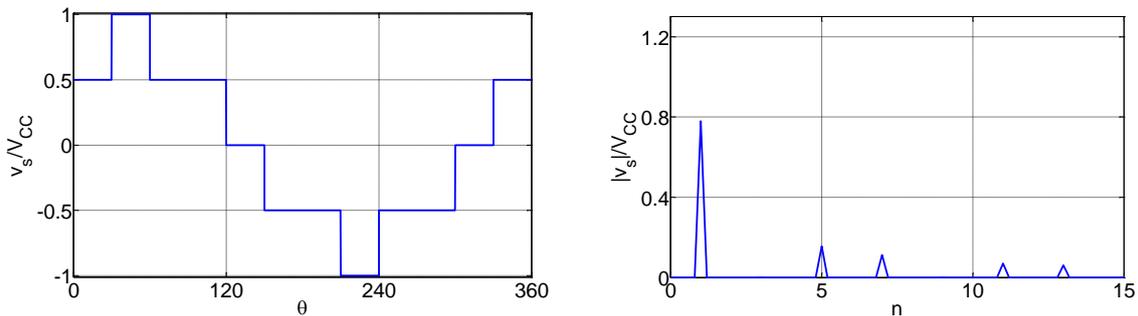


Figura 3.12. Tensione  $v_s$  generata dell’invertitore a tre livelli con  $\alpha = 90^\circ$  e  $\beta = 30^\circ$ .

tensioni di fase per annullare un’armonica della tensione di uscita. A tale scopo gli interruttori statici di ogni ramo dell’invertitore sono comandati in modo che le tensioni  $v_{AN}$  e  $v_{BN}$ , mantenendo le usuali condizioni di simmetria, siano nulle per un prefissato intervallo angolare  $\beta$ . Si dimostra che se  $\beta = 30^\circ$  la forma d’onda quasi quadra risultante per le tensioni di linea, tracciata in Figura 3.11, non contiene la terza armonica. Di conseguenza anche la tensione  $v_s$  è priva della terza armonica. Per variare l’ampiezza della componente fondamentale di  $v_s$ , analogamente a quanto accade per l’invertitore a due livelli, la tensione di fase  $v_{BN}$  è ritardata di  $\alpha$  rispetto a  $v_{AN}$ . Nella parte sinistra della Figura 3.12 è tracciata la tensione  $v_s$  generata dall’invertitore a tre livelli per  $\alpha=90^\circ$ ; nella parte destra è riportato il suo spettro.

Tenere a zero le tensioni di linea per un intervallo angolare  $\beta$  comporta una riduzione pari a  $\cos(\beta)$  nell’ampiezza della componente fondamentale di  $v_s$ . In particolare, per  $\beta = 30^\circ$ , l’ampiezza massima della componente fondamentale è

$$V_{s,1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_{CC} \tag{3.10}$$

Essa è circa 0.866 volte minore dell’ampiezza (massima) che si ottiene con un invertitore a due livelli.

## 4 Progetto preliminare di un sistema di ricarica dinamica wireless

### 4.1 Caratteristiche del veicolo elettrico scelto come caso di studio

Il sistema DWC è destinato ad effettuare la ricarica degli accumulatori del veicolo elettrico URBE mostrato in Figura 4.1. Le principali caratteristiche del veicolo sono riportate in Tabella 4.I mentre le caratteristiche degli accumulatori a bordo del veicolo sono riportate in Tabella 4.II.

Sulla scorta dei parametri riportati nelle tabelle è possibile stimare l’ammontare della potenza (elettrica)  $P_a$



**Figura 4.1. Veicolo elettrico URBE.**

**Tabella 4.I. Caratteristiche del veicolo elettrico URBE.**

<i>Quantità</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Valore</i>
Massa	m	756 kg
Velocità massima	U	50 km/h
Coefficiente di attrito aerodinamico	$C_d$	0.28
Area frontale	$A_f$	2.1 m <sup>2</sup>
Coefficiente di attrito volvente	$K_{rf}$	0.01
Efficienza dell'azionamento di propulsione	$\eta_{pd}$	0.82
Larghezza massima dell'alloggiamento del pickup	b	1150 mm
Lunghezza massima dell'alloggiamento del pickup	l	1450 mm
Altezza dal suolo	$C_g$	170 mm

**Tabella 4.II. Caratteristiche degli accumulatori del veicolo elettrico URBE.**

<i>Quantità</i>		<i>Simbolo</i>	<i>Valore</i>
Tensione nominale		$V_B$	48 V
Capacità		$C_B$	120 A·h
Potenza massima di carica		$P_{B,M}$	672 W

assorbita dal bus in corrente continua del veicolo al fine di caricare gli accumulatori e alimentare l'azionamento di propulsione.

La forza  $F$  necessaria a mantenere il veicolo in movimento alla massima velocità è data da due termini: la resistenza aerodinamica  $F_d$  e la forza di attrito volvente  $F_{roll}$

$$F = F_d + F_{roll} \quad (4.1)$$

Il termine  $F_d$  è espresso dalla

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_{air} A_f U^2 \quad (4.2)$$

e il termine  $F_{roll}$  dalla

$$F_{roll} = K_{rf}mg \quad (4.3)$$

Sostituendo la densità dell'aria  $\rho_{air}$  (1,167 kg/m<sup>3</sup>) e l'accelerazione di gravità  $g$  (9.81 m/s<sup>2</sup>) nelle (4.2) e (4.3), la forza  $F$  nella (4.1) risulta di circa 140 N e la potenza meccanica necessaria per mantenere il veicolo alla velocità costante  $U$  di 50 km/h è di circa 1950 W.

Tenendo conto dell'efficienza dell'azionamento di propulsione  $\eta_{pd}$  (stimata in 0.8), la potenza elettrica  $P_{pd}$  assorbita da esso è uguale

$$P_{pd} = \frac{1}{\eta_{pd}}FU \approx 2400 W \quad (4.4)$$

Sommando a quest'ultima la potenza elettrica assorbita dagli accumulatori in ricarica, si ottiene la potenza elettrica  $P_v$  assorbita dal veicolo, data dalla

$$P_v = P_{pd} + P_{B,M} \approx 3100 W \quad (4.5)$$

#### 4.2 Dimensionamento degli stadi di potenza

La (4.5) rappresenta la potenza d'uscita del chopper della sezione ricevente. Il dimensionamento degli stadi di potenza è eseguito ipotizzando un valore conservativo di 0.9 per l'efficienza di ognuno di essi. Si regoli la tensione  $V_{dc}$  all'ingresso del chopper a 65V; la corrente  $I_{ch,in}$  all'ingresso del chopper è uguale a

$$I_{ch,in} = \frac{P_v}{\eta_c} \frac{1}{V_{dc}} \cong 53 A \quad (4.6)$$

dove  $\eta_c$  è l'efficienza del chopper. Tenendo conto anche dell'efficienza  $\eta_r$  del raddrizzatore a diodi, la tensione  $V_p$  risulta

$$V_p = \frac{1}{\eta_r} \frac{4}{\pi} V_{dc} \cong 92 V \quad (4.7)$$

Dalla (4.6) si calcola la corrente che scorre nel pickup, data dalla

$$I_p = \frac{\pi}{2} I_{ch,in} \cong 84 A \quad (4.8)$$

La (4.8) fornisce anche la corrente che scorre nel condensatore di risonanza  $C_p$ .

Come riportato nella Sezione 2, il layout del track è formato da bobine disposte fianco a fianco, operando quindi in condizione di OFC con  $X_t=D$ . In questa condizione la tensione  $V_p$  indotta nel pickup ha ampiezza costante. Nella successiva Sezione 4.3, si ricaveranno i seguenti dati preliminari per le bobine in condizioni di sovrapposizione:  $L_t=45 \mu H$ ,  $M_0=15 \mu H$  e  $k_0=0.33$ . Sostituendo  $k_0$  e la (4.7) nella (3.8) si ottiene l'ampiezza massima della tensione di alimentazione del track

$$V_s \cong 280 V \quad (4.9)$$

Nell'ipotesi di alimentare il track con una rete monofase a 230 V (e con potenza di circa 4 kW per tenere conto di un'efficienza complessiva -dall'ingresso in CA di rete all'uscita in CC del chopper- stimata in 0.75), la tensione  $V_{CC}$  disponibile all'uscita del raddrizzatore connesso a rete è di circa 325 V, sufficiente per impiegare un invertitore HF a tre livelli per l'alimentazione del track.

La resistenza  $R_p$  vista dal pickup, calcolata dividendo la (4.7) per la (4.8), è uguale a

$$R_p \cong 1.1 \Omega \quad (4.10)$$

Di conseguenza, l'impedenza resistiva  $\dot{Z}_{ref}$  di Figura 3.7 varia da  $59 \Omega$ , in condizioni di sovrapposizione, a 0, quando la posizione relativa  $x$  del pickup è uguale a  $X_t$ . In corrispondenza, l'impedenza resistiva  $\dot{Z}_s$  varia da  $9.8 \Omega$  a  $\infty$  e la corrente fornita dall'invertitore HF (e che scorre in  $L_{at}$ ) varia da 28.6 A a 0.

### 4.3 Progetto di massima delle bobine

Le bobine del track ed il pickup siano di tipo DD e uguali fra loro. Al fine di minimizzare gli effetti del disallineamento è conveniente che le bobine siano il più larghe possibile. Di conseguenza  $Y_t$  è stata scelta pari a 950 mm, che è la massima larghezza compatibile con le dimensioni dell'URBE e con un'agevole installazione del pickup sotto il suo pianale, come mostrato in Figura 4.2.

Lunghezza e numero di spire La lunghezza  $X_t$  e il numero di spire  $N$  delle bobine sono stati determinati per mezzo di una serie di analisi FEM eseguita su modelli tridimensionali nei quali  $X_t$  ed  $N$  comparivano come parametri. I modelli includevano i nuclei piani di ferrite. L'analisi era volta a conseguire un coefficiente di accoppiamento in condizioni di sovrapposizione pari a circa 0.3 che, in letteratura, è ritenuto un valore ottimale. I risultati ottenuti sono stati rispettivamente di 0.336 m per la lunghezza e di 4 per il numero di spire, con valori dell'autoinduttanza, della mutua induttanza e del coefficiente di accoppiamento in condizioni di sovrapposizione pari rispettivamente a  $45 \mu\text{H}$ ,  $15 \mu\text{H}$  e 0.33.

Successivamente sono state analizzate le caratteristiche delle bobine dimensionate. Nello specifico, è stata ricavata la dipendenza -dalla posizione relativa  $x$  del pickup- dei parametri induttivi dell'accoppiamento formato da una bobina del track, isolata dalle altre, e dal pickup. La Figura 4.3 (a) riporta l'andamento della autoinduttanza. Essa varia di circa il 10% per  $x$  che passa da 0 ad  $X_t$  (a causa della presenza dei nuclei di ferrite). La Figura 4.3 (b) riporta con linea blu l'andamento della mutua induttanza e con linea rossa l'andamento lineare che lo approssima, calcolato con le modalità descritte nella Sezione 2.2. Confrontando la Figura 3.4 con la Figura 4.3 (b) si nota come lo scostamento dall'approssimazione lineare sia maggiore per l'accoppiamento dimensionato; questo risultato è da imputare alla ridotta lunghezza delle bobine rispetto alla larghezza. Infine, la Figura 4.3 (c) riporta l'andamento del coefficiente di accoppiamento.

Tensioni e correnti Per la (3.5) la corrente nelle bobine del track risulta

$$I_t = \frac{V_s}{\omega_s L_t} \cong 11.6 \text{ A} \quad (4.11)$$

La tensione ai capi delle bobine è data da due contributi: la caduta di tensione sull'impedenza induttiva della bobina stessa e la tensione indotta dall'altra bobina. Sia per le bobine del track che per il pickup i due

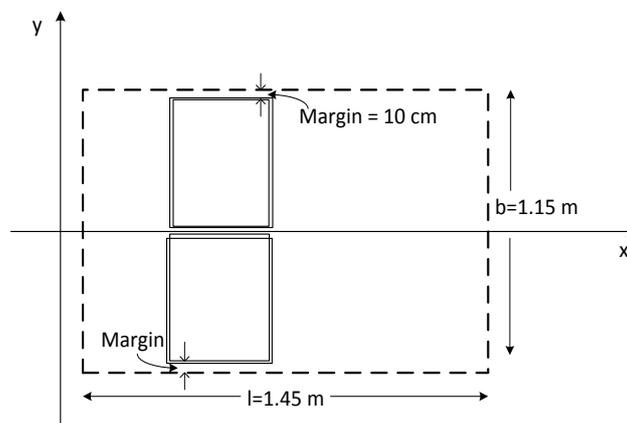


Figura 4.2. Dimensioni dell'URBE e larghezza del pickup.

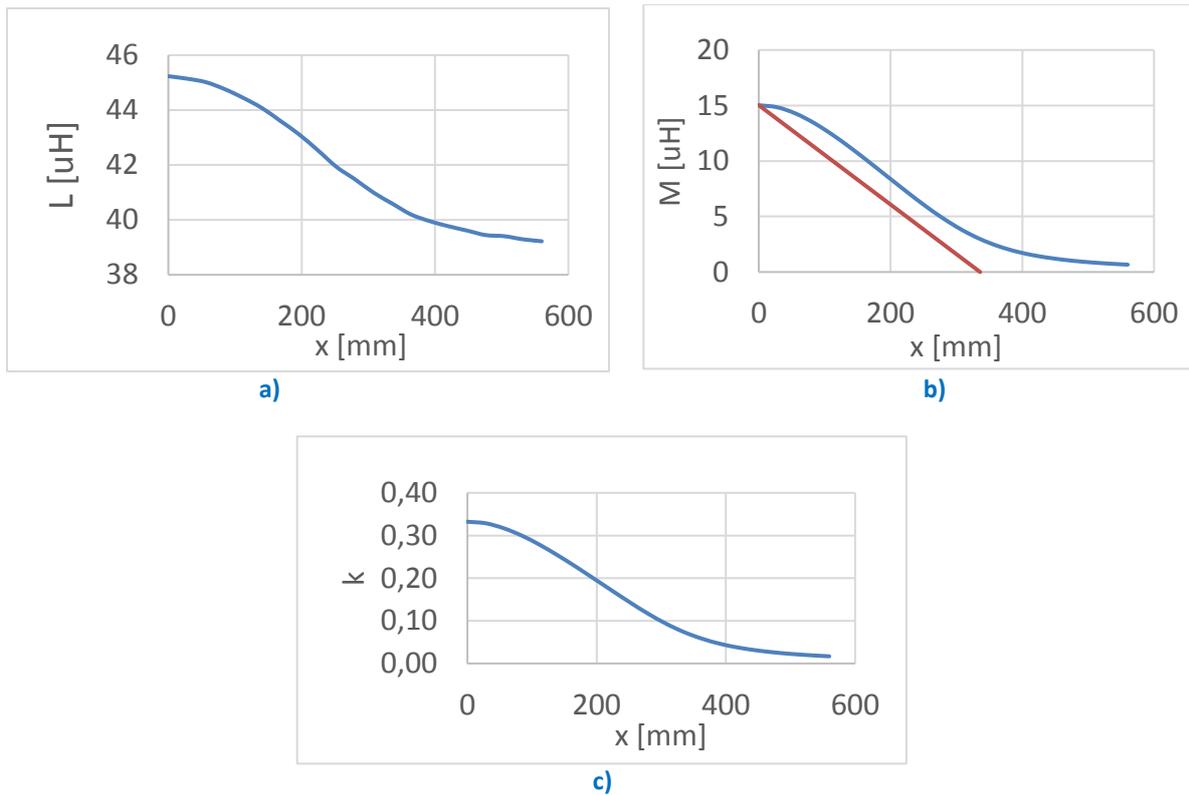


Figura 4.3. Autoinduttanza (a), mutua induttanza (b) e coefficiente di accoppiamento (c) in funzione della posizione relativa x del pickup.

contributi sono in quadratura. Di conseguenza le tensioni totali ai capi delle bobine sono

$$V_{L_t} = \sqrt{(V_s)^2 + (\omega_s M_0 I_p)^2} \cong 732 \text{ V} \quad (4.12)$$

$$V_{L_p} = \sqrt{(\omega_s L_p I_p)^2 + (V_p)^2} \cong 2020 \text{ V} \quad (4.13)$$

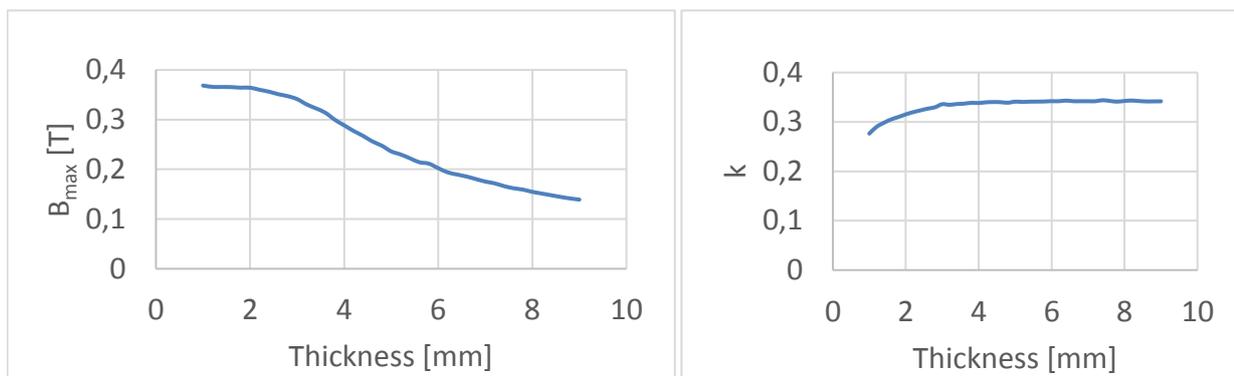
I parametri di dimensionamento delle bobine sono riassunti nella Tabella 4. IV.

Dimensionamento del nucleo magnetico E' stata infine analizzata la possibilità di ridurre lo spessore dei nuclei in ferrite e di modificarne la struttura, con l'obiettivo di minimizzarne il costo e il peso.

Per quanto riguarda lo spessore, è stata effettuata una serie di analisi FEM sull'accoppiamento dimensionato, applicando ad una delle bobine una corrente di 100 A. Lo spessore del nucleo di entrambe le bobine è stato via via ridotto ed è stata calcolata l'intensità massima della induzione magnetica nel nucleo sul quale è adagiata la bobina percorsa da corrente. I valori ottenuti sono riportati in Figura 4.4. Il materiale impiegato in sede di analisi è stata la ferrite NL80S\_23deg che entra in saturazione quando l'induzione magnetica supera 0.3 T. Dai risultati ottenuti, riportati in Figura 4.4 (a), emerge che l'induzione magnetica di 0.3 T si ottiene con uno spessore del nucleo di circa 4 mm. La riduzione di spessore altera anche i parametri induttivi della bobina.

**Tabella 4.IV. Parametri di dimensionamento delle bobine.**

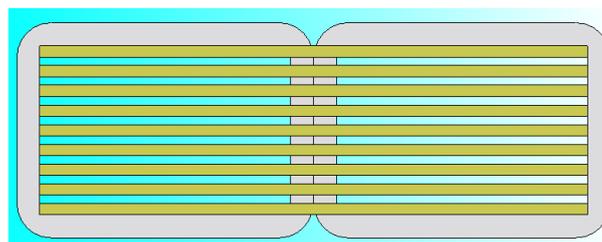
Parametro	Track	Pickup
Lunghezza	0.336 m	0.336 m
Larghezza	0.950 m	0.950 m
Autoinduttanza	45 $\mu$ H	45 $\mu$ H
Mutua induttanza	14 $\mu$ H	14 $\mu$ H
Numero spire	4	4
Corrente	13 A	84 A
Tensione	700 V	2020 V



**Figura 4.4. Massima induzione magnetica (a) e coefficiente di accoppiamento (b) in funzione dello spessore del nucleo.**

In particolare, la Figura 4.4 (b) mostra che il coefficiente di accoppiamento comincia a scendere rispetto al valore di 0.33 ottenuto in precedenza quando lo spessore del nucleo diventa minore di 4 mm.

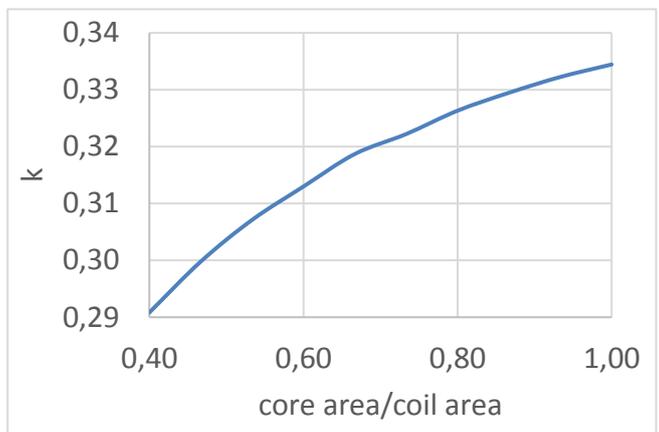
Per quanto riguarda la struttura del nucleo, si è deciso di impiegare barre equidistanziate di ferrite al posto di un nucleo compatto. Si è partiti da una situazione iniziale di 15 barre addossate di spessore 4 mm, che riproduce la struttura di un nucleo compatto, e si è ridotto progressivamente il numero delle barre mantenendo uniforme la loro spaziatura secondo la disposizione illustrata in Figura 4.5. Per ognuna delle configurazioni risultante è stata effettuata un'analisi FEM per valutare i parametri induttivi dell'accoppiamento formato da una bobina del track e dal pickup in condizioni di sovrapposizione. I parametri induttivi ottenuti sono riportati nella Tabella 4.V in funzione del numero di barre che costituiscono il nucleo. La seconda colonna fornisce la frazione di superficie delle bobine coperta dalle barre cosicché il valore 1 corrisponde ad un nucleo costituito da una unica piastra. I dati relativi al coefficiente di accoppiamento sono riportati graficamente nella Figura 4.6. I risultati in tabella e di figura mostrano che i parametri induttivi decrescono indicativamente solo del 10% pur riducendo a metà la superficie ricoperta dalle barre. Il risultato



**Figura 4.5. Nucleo formato da barre di ferrite.**

**Tabella 4.V. Mutua induttanza, autoinduttanza e coefficiente di accoppiamento per diverse strutture del nucleo.**

# bars	Core area/Coil area	M ( $\mu H$ )	L ( $\mu H$ )	k
15	1,00	14.9	44.7	0,33
14	0,93	14.4	43.3	0,33
13	0,87	13.9	42.3	0,33
12	0,80	13.4	41.2	0,32
11	0,73	12.9	40.1	0,32
10	0,67	12.4	38.8	0,32
9	0,60	11.8	37.6	0,31
8	0,53	11.1	36.3	0,31
7	0,47	10.5	35.1	0,30
6	0,40	9.82	33.8	0,29



**Figura 4.6. Coefficiente di accoppiamento in funzione della frazione di superficie coperta dalle barre.**

ottenuto ha una importante conseguenza applicativa in quanto non solo suggerisce la convenienza di realizzare il nucleo per mezzo di barre ma dà anche indicazioni sulla scelta della superficie da ricoprire con le barre.

## 5 Conclusioni

Il lavoro di ricerca ha avuto per finalità il progetto preliminare di un sistema wireless destinato alla ricarica degli accumulatori di un veicolo elettrico in movimento (ricarica dinamica). Le attività svolte per pervenire al progetto preliminare hanno utilizzato procedure di progetto, analisi orientate al progetto e soluzioni circuitali elaborate ad hoc o descritte nella più recente letteratura in materia.

Più precisamente, le tematiche affrontate hanno riguardato il progetto preliminare del layout del track del sistema di ricarica dinamica wireless e dei componenti della sua sezione trasmittente, inclusa la bobina della sezione ricevente. Sono state anche delineate struttura e operazioni dei componenti della sezione ricevente.

Riguardo al layout del track, è stata sviluppata una procedura di progetto per determinare la distanza alla quale porre le bobine del track e il corrispondente profilo della potenza trasferita alla sezione ricevente.

Riguardo ai componenti della sezione trasmittente, a) sono state indagate le caratteristiche induttive delle bobine di tipo DD, b) è stato introdotto un circuito di compensazione che rende l'ampiezza della corrente circolante nelle bobine del track dipendente unicamente dalla tensione di alimentazione della sezione

trasmittente, c) è stata esaminata la possibilità di alimentare la sezione trasmittente con un invertitore multilivello.

I risultati delle attività sopra esposte sono stati esaminati alla luce delle prestazioni richieste e delle specifiche poste per il sistema di ricarica dinamica wireless del veicolo elettrico scelto come caso di studio e hanno condotto alla definizione della configurazione del sistema, al dimensionamento degli stadi di potenza e al progetto di massima delle bobine di accoppiamento.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. G. Buja, M. Bertoluzzo, and H. K. Dashora, "Lumped Track Layout Design for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6631-6640, Oct. 2016.
2. J.T. Boys and G.A. Covic, "The inductive power transfer story at the University of Auckland", *IEEE Circuits and Systems Magazine*, no. 2, pp. 6-27, 2015.
3. C.S.Wang, G.A.Covic, and O.H.Stielau, "Investigating an LCL load resonant inverter for inductive power transfer applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 995-1002, July 2004.

## 7 Abbreviazioni ed acronimi

DWC	Ricarica dinamica wireless
DD	Doppio D
HF	Alta frequenza
OFC	Ricopertura sovrapposta di flusso
Q	Quadratura
SFC	Ricopertura separata di flusso

C	Condensatore, Capacità
i	Corrente
p	Potenza
v	Tensione
L	Bobina/induttore, Autoinduttanza
M	Mutua induttanza
R	Resistenza
T	Periodo
x,y,z	Terna di assi ortogonali
X	Lunghezza
Y	Larghezza
Z	Impedenza

### Pedici

a	Addizionale
b	Accumulatore
c	Compensazione
CC	Lato in continua del track
ch	Chopper
dc	Lato in continua del pickup
es	Immagazzinamento di energia
f	Filtro
in	Ingresso
out	Uscita
p	Pickup

pd	Azionamento di propulsione
r	Raddrizzatore
ref	Riportato
s	Sorgente/alimentazione
t	Track
v	Veicolo
0	Condizione di sovrapposizione

Sono state inoltre impiegate le seguenti notazioni: lettera minuscola per le grandezze variabili; lettera maiuscola per le grandezze continue (con ampiezza costante o variabile lentamente) e i valori efficaci, di picco e medi delle grandezze variabili; lettera maiuscola sovrastata da una lineetta per i fasori delle grandezze sinusoidali.

## 8 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 "Enertronica" e di "Veicoli elettrici stradali". Ha svolto attività di ricerca nei campi della mobilità elettrica e delle applicazioni industriali elettriche. In tema di mobilità elettrica, ha progettato, realizzato ed effettuato attività sperimentali su apparati prototipali per la ricarica wired e wireless di veicoli elettrici, su powertrain con motori ruota e con diverse tipologie di alimentazione: accumulatori agli ioni di litio, celle a combustibile e sistemi di immagazzinamento misto dell'energia accumulatori-supercondensatori. In tema di applicazioni industriali elettriche, ha sviluppato e sperimentato schemi per il controllo di motori asincroni e sincroni a magneti permanenti, e reti di campo sia event-triggered che time-triggered per il governo di sistemi elettrici critici dal punto di vista della sicurezza.

Giuseppe Buja è professore ordinario 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 "Apparati per la conversione elettrica di fonti rinnovabili". I suoi interessi scientifici riguardano l'elettronica di potenza e l'elettronica industriale con applicazioni nei settori dell'automazione e della veicolistica. Ha svolto attività di ricerca sui convertitori statici di energia elettrica, sugli azionamenti elettrici in corrente alternata e sui sistemi di controllo e di networking per applicazioni industriali. Attualmente svolge attività di ricerca sui sistemi di ricarica wired e wireless dei veicoli elettrici e sui sistemi di conversione statica e di controllo per microgrid. Ha ricevuto il Mittelmann Award dalla Società di Elettronica Industriale di IEEE "in recognition of his outstanding technical contributions to the field of industrial electronics". È editore associato di IEEE Transactions on Industrial Electronics, membro del comitato di redazione di Chinese Journal of Electrical Engineering, ed è stato Corresponding Guest Editor per IEEE Transactions on Industrial Electronics della Special Session intitolata "Dynamic Charging of Electric Vehicles by Wireless Power Transfer".