



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Dimensionamento di un sistema WPT
per veicoli elettrici commerciali**

Candidato:
Alberto Frizzarin
Matricola 1081176

Relatore:
Prof. Fabrizio Dughiero

*Alla mia famiglia,
senza la quale niente sarebbe stato realizzabile.*

Indice

Abstract	vii
Ringraziamenti	ix
Introduzione	1
1 Tecnologia	5
1.1 WPT	5
1.1.1 Evoluzione	5
1.1.2 Fondamenti teorici	6
1.2 Design del sistema	9
1.2.1 Carica stazionaria	9
1.2.2 Ricarica in movimento	12
1.3 Circuito di compensazione	13
1.3.1 Compensazione SPS	15
1.3.2 Compensazione parallelo	16
1.3.3 Strategie di controllo	17
1.4 Elettronica di potenza	17
1.5 Altre considerazioni	20
1.5.1 Metodi di studio	20
1.5.2 Sicurezza del sistema	21
1.5.3 Vehicle to Grid	22
1.5.4 Comunicazione wireless	22
2 Soluzioni commerciali	23
2.1 Conductix-Wampfler	23
2.2 Bombardier e-primove	26
2.2.1 PRIMOVE package	26
2.2.2 Applicazioni in studio	28
2.3 KAIST	30
2.4 Qualcomm Halo IPT	32
2.4.1 Applicazioni stradali	33

3	Dimensionamento di un sistema WPT	35
3.1	Considerazioni preliminari	35
3.1.1	Veicolo destinatario	35
3.1.2	Dati	36
3.1.3	Procedimento di analisi	38
3.1.4	Cedrat Flux 11.2	40
3.2	Pad rettangolare	42
3.2.1	Geometria	42
3.2.2	Compensazione	45
3.2.3	Risposta ai disallineamenti	48
3.3	DD Pad	54
3.3.1	Geometria	54
3.3.2	Compensazione	56
3.3.3	Risposta ai disallineamenti	60
3.4	Confronto tipologie	64
4	Dimensionamento del sistema globale	67
4.1	Studio dell'alimentazione dinamica	67
4.1.1	Elettronica di potenza	74
4.1.2	Configurazione finale	77
4.1.3	Impianto	81
4.2	Progetto dello schermo	82
4.3	Stima dei costi	85
	Conclusione	87
	Bibliografia	89

Abstract

Il settore dei trasporti è una delle criticità maggiori per quanto riguarda le emissioni nocive per il nostro ecosistema molto è stato fatto, ma ancora tanto può essere fatto per migliorare la situazione. L'utilizzo di veicoli elettrici rappresenta un passo decisivo in questo senso, infatti centralizzando la produzione di energia elettrica si aumentano i rendimenti e si controllano in miglior modo le emissioni di gas serra. Oltre a rendere più vivibili gli ambienti urbani, limitando lo smog e i rumori prodotti dai veicoli stessi.

In questo progetto si vuole dimensionare un sistema di alimentazione wireless per i veicoli elettrici commerciali, che rappresentano la tipologia più critica per quanto riguarda le autonomie garantite, attraverso la simulazione su un software FEM. In particolare, si fa riferimento alla tecnologia del wireless power transmission (WPT) in una linea di prova di 100 m nella quale implementare il sistema formato da diversi pad posti in successione, in modo da garantire una continuità nella trasmissione di potenza. La peculiarità di questo sistema è nella messa in risonanza degli avvolgimenti stessi, in modo da contenere la potenza reattiva e sfruttare al meglio tutto il rame a disposizione.

Attualmente, ci sono diverse scuole di pensiero riguardo la geometria degli avvolgimenti da adottare; in questa sede, si sono dimensionate due diverse tipologie, dimostrate le più promettenti: quella rettangolare e quella a doppia D. Contestualmente, si sono anche valutati gli effetti del tipo di compensazione da adottare nel sistema, al fine di ottenere le migliori prestazioni possibili. Inoltre, anche l'utilizzo di un generatore di tensione piuttosto che di corrente determina le caratteristiche di funzionamento del sistema. La configurazione finale del sistema è formata quindi dal pad con avvolgimento a doppia D con compensazione serie-serie e un generatore di corrente. Si è quindi proseguito con la valutazione degli effetti della marcia del veicolo su questi pad, tracciando gli andamenti di potenza e determinando la distanza tra un pad e il successivo. Per assicurare l'opinione pubblica sulla sicurezza del sistema, si è studiato il campo prodotto nelle vicinanze del sistema ed è stato aggiunto uno schermo di alluminio per rispettare le normative emanate dalla ICNIRP. Inoltre, è stata condotta un'analisi termica dello stesso al fine di valutare l'impatto delle correnti parassite. Infine, si è data una stima dei costi che questo sistema può avere.

Si sono ottenuti risultati promettenti per quanto riguarda le prestazioni del sistema, garantendo una potenza media trasmessa di 28,3 kW che può essere considerata una vera e propria alimentazione elettrica del veicolo data la sua entità. Tuttavia, la configurazione della linea proposta presenta ancora un costo troppo elevato per un suo utilizzo e l'implementazione di una logica di controllo è indispensabile in tal senso.

Ringraziamenti

Alla fine sono giunto anche io alla fine di questo lunghissimo percorso iniziato quasi 20 anni fa chiamato scuola. È stato un viaggio ricco e costellato di gioie e dolori e moltissime persone vi hanno preso parte. Persone che hanno cercato di rallentarmi, che mi hanno stimolato e sfidato, che mi hanno aiutato e accompagnato, chi per qualche mese, chi per anni. Tante hanno portato un contributo a farmi diventare quello che sono e perciò mi sento di ringraziarle dal profondo.

Innanzitutto vorrei iniziare con chi ha reso possibile l'ultimo faticoso passo: la tesi. A Nicolò che mi ha fin troppo pazientemente ascoltato e guidato in tutto il percorso non facendomi mai mancare il sostegno e il consiglio giusto al momento giusto. A Mattia scrupoloso conoscitore del più malefico software mai creato, grazie per avermi risolto i più annosi problemi con il maledetto Flux 11.1 e fatto compagnia nei lunghi viaggi con Trenitalia. A Nicola, Christian e Antonio che con la vostra presenza avete allietato le giornate in laboratorio e dato il giusto supporto morale a questo povero tesista.

Prima di passare al lato oscuro di Trenitalia però, ho condiviso il resto del percorso in compagnia degli ormai famosissimi signori Pinato. Grazie ad Enrico, compagno di stanza per tutta la mia permanenza, inesauribile fonte di sapere a dispetto della sua (scarsa!) memoria. A Lele, ormai uno di noi, Antonio e Matteo, per aver regalato momenti di pura gioia negli lunghi mesi di lezione e nelle infinite sessioni d'esame.

Grazie ai ragazzuoli Diego, Marco, Fui, Naia, Compost e Giulia per l'inesauribile fonte di risate che rappresentano. Ne abbiamo fatte tantissime insieme e tante ancora ne dovranno venire, tutte da gustare come fossero la prima. Grazie al Nano, compare instancabile di sciate e di ciaccolate (degno figlio sua madre), sempre disponibile e dispensatore di ottimi consigli. Grazie a Fedino, quante cazzate filosofiche uscite dalla mia bocca hai dovuto sopportare, impegnatissimo su tutti i fronti ma sempre pronto per un amico. Grazie a Lello, fedele amico, indispensabile lungo tutta la strada percorsa assieme (che è proprio tanta!).

Grazie a tutti i compagni di squadra che la pallavolo ha saputo regalarmi, alcuni vere spine nel fianco che mi hanno fatto crescere, mentre altri persone d'oro con le quali ho trascorso i migliori anni coronando sogni e stagioni anche con risultati pazzeschi. Nominarvi tutti sarebbe un elenco più lungo persino di questa tesi, avrete sempre un posto nei miei ricordi, è stato un onore poter giocare al vostro fianco. Grazie in particolare ad Andrea, Fabio, Giovanni, Matteo e Michele, Michele, Mirko, Damiano e Jacopo vi siete dimostrati amici veri anche fuori dai palazzetti.

Grazie a tutti gli allenatori che mi hanno plasmato e insegnato qualcosa di questo

magnifico sport, ma soprattutto che mi avete insegnato a divertirmi. Grazie a Ugo, senza di te non sarei mai arrivato dove sono ora, hai reso raggiungibili traguardi che mai avrei pensato alla mia portata.

Grazie ai nonni Maria e Stefano, Graziella e Graziano, a tutti gli zii e cugini per il tempo passato assieme, siete state importantissime guide e fonte d'ispirazione dalle quali tanto ho appreso.

Grazie a Katia e Antonio, non riesco a trovare le parole per scrivere quello che rappresentate per me. Mi avete dato un tetto quando ne avevo bisogno, tutto il sostegno e il supporto come fossi un figlio per voi, non potrò mai ringraziarvi a sufficienza per la vostra costante presenza nella mia vita.

Grazie ad Eleonora, per l'enorme gioia che mi trasmetti e l'infinita pazienza che porti. Dal primo giorno che ci siamo incontrati (grazie Michela!) mi doni i tuoi sorrisi e mi rendi felice oltre ogni misura. Non avrei potuto chiedere di meglio.

Grazie alla mia famiglia che non mi ha fatto mai mancare l'amore e la guida di cui avevo bisogno, anche nei miei momenti peggiori.

Grazie a Pincio, per aver portato una ventata di freschezza e allegria in casa quando ce n'era tanto bisogno. Sono orgoglioso di come stai crescendo e vedi di continuare così mi raccomando.

Grazie alla mia capretta Anna, sempre presente e pronta a soccorrermi in ogni occasione senza esitazioni. Sono sicuro farai tanta strada, qualunque sia quella che sceglierai, ma mai abbastanza per allontanarti da me.

Grazie a papà Flavio, attento e delicato come nessuno, spero di essere tuo motivo d'orgoglio ovunque tu sia.

Grazie a mamma Gianna, caposaldo di questa famiglia di cui vado tanto orgoglioso. Non sei capitolata nemmeno di fronte alle insidie peggiori che ci si sono messe davanti, ci hai protetto e cresciuto in un modo che posso solo sperare di avvicinare. Solo grazie a voi il raggiungimento di questo traguardo è stato realizzabile, non riuscirò mai a dimostrare quanto sia grato per tutto ciò che fate per me.

Vi voglio bene,

Introduzione

Sin dalla fine del XIX secolo, agli albori dell'ingegneria elettrica, si è resa palese l'esigenza di creare un'interconnessione sempre su più vasta scala che riuscisse a collegare produttori ed utilizzatori anche su distanze continentali. Il pioniere in questo campo è stato sicuramente Nikola Tesla che, assieme a George Westinghouse, ha vinto la cosiddetta "guerra delle correnti" contro Thomas Edison facendo prevalere la distribuzione lungo gli elettrodotti in regime di corrente alternata monofase prima e trifase poi.

Tuttavia, sebbene questa sia la tecnologia che si è affermata in seguito a livello globale, Tesla aveva ricercato un metodo di trasmissione basato sulle onde elettromagnetiche che non fosse legato ad un mezzo conduttore, ma per l'appunto, wireless. Purtroppo, a causa di impedimenti tecnici e finanziari che non gli consentirono di ultimare i suoi studi, egli era riuscito a dimostrarne l'efficacia solo per quanto riguarda la trasmissione di segnali, non per quella di potenza, così questo settore venne accantonato.

Negli ultimi decenni però si è assistito ad un incremento esponenziale di dispositivi portatili che, per funzionare, necessitano di sistemi di accumulo di energia che costituiscono buona parte sia del peso sia del costo dell'oggetto stesso. Inoltre questi sono legati indissolubilmente all'esigenza di essere ricaricati più o meno frequentemente con tutti i disagi che questo può comportare. È quindi rinato l'interesse per soluzioni che colleghino questi dispositivi alla rete elettrica senza l'uso di cavi e prese, diminuendo così i relativi costi e ingombri, permettendo invece di aumentarne la capacità e il comfort di utilizzo.

Il mezzo che è stato individuato come candidato naturale per questo scopo è l'onda elettromagnetica. Il metodo ideato da Tesla coinvolgeva campi elettrici molto forti e potenzialmente dannosi per la salute; oggi invece si sono ricercati metodi che siano unidirezionali, poiché le perdite associate sarebbero troppo elevate, e che non richiedano, come i laser ad esempio, una *line-of-sight* ininterrotta, a cui sono legati i problemi dei sistemi di *tracking* quando l'oggetto è in movimento.

Un team di ricercatori del MIT di Boston ha concentrato la propria attenzione sull'utilizzo del fenomeno della risonanza che in ogni campo fisico (acustico, meccanico, ecc..) è intuitivamente molto efficiente vista la scarsa interazione con oggetti con cui non è accoppiata la sorgente. Concentrando l'analisi sul campo elettromagnetico, questo sistema offre inoltre altri indubbi vantaggi per il trasferimento di potenza a medio raggio (la distanza non supera la lunghezza caratteristica del sistema di 10 volte) quali non dover orientare la sorgente, non interagire con materiali non conduttori e non essere vincolata alla configurazione dell'ambiente circostante, cioè non necessitare di una *line-of-sight* sgombra da ostacoli.

Come prima impressione questo metodo può sembrare simile all'induzione elettromagnetica, tuttavia vi si palesano indubbie e consistenti differenze che rendono la risonanza magnetica molto più appetibile per il trasferimento di potenza wireless. Innanzitutto essa agisce su distanze maggiori rispetto all'induzione ordinaria, inoltre non necessita che i dispositivi in risonanza condividano un nucleo di materiale ferromagnetico o siano posizionati praticamente a contatto per confinare l'induzione magnetica al fine di mantenere un rendimento accettabile del sistema.

Nel corso degli ultimi decenni si è assistito ad un aumento della sensibilità della popolazione nei confronti della sostenibilità del nostro ecosistema a causa del vertiginoso aumento di gas serra, principalmente anidride carbonica, nell'atmosfera. Il settore dei trasporti, che utilizza quasi esclusivamente i derivati del petrolio, costituisce uno dei maggiori produttori di CO₂ e, di conseguenza, uno dei campi dove, grazie alla ricerca e all'innovazione possono essere raggiunti i risultati migliori a favore dell'ambiente.

Basti pensare a come si stanno evolvendo rapidamente i sistemi di propulsione delle vetture anche per uso personale: dal semplice motore a combustione interna, attraverso tecnologie ibride, fino a veicoli completamente elettrici che azzerano le emissioni in atmosfera di gas serra, particolato e gas nocivi. Tuttavia questi palesano indubbie difficoltà ad affermarsi nel mercato a causa del loro costo elevato provocato dalla grande quantità di sistemi di accumulo chimici che nonostante ciò non riescono a garantire un'elevata autonomia di utilizzo del mezzo stesso.

Sono state individuate diverse possibilità per cercare di porre rimedio a questo grave difetto basate su diversi principi di funzionamento, le principali sono: l'utilizzo di supercondensatori o celle a idrogeno al posto delle batterie e il collegamento degli automezzi direttamente alla rete elettrica. Le celle a combustibile costituiscono una valida alternativa ambientale, tuttavia, a causa dell'alto consumo di energia per l'idrolisi mostrano, per ora, costi intrinseci elevati e quindi difficilmente sostenibili. I supercondensatori, invece, sono ancora legati alla bassa autonomia, anche se i più recenti sistemi permettono con una carica di appena 30 secondi di poter usufruire del mezzo per oltre 15 minuti, fattore perfettamente funzionale per l'utilizzo su mezzi pubblici, costretti a continue e frequenti fermate per il servizio che svolgono.

Il collegamento diretto alla rete elettrica convenzionale, cioè tramite pantografi, risulta difficilmente applicabile per la completa elettrificazione che dovrebbero avere tutte le strade comportando un investimento molto oneroso, un certo grado di pericolosità e deturpando la bellezza sia di ambienti urbani che naturali.

Tra le numerose applicazioni che la trasmissione di potenza wireless (WPT) può vantare, sono presenti la ricarica e l'alimentazione diretta di veicoli elettrici, sia in condizioni statiche che dinamiche, che la rendono la tecnologia più adatta a questo scopo vista l'assenza di collegamenti diretti e visibili. Come si vedrà, questa può permettere la diminuzione di almeno il 20% della capacità del pacco batterie e rendere quindi più appetibile l'utilizzo di questa tipologia di veicoli, soprattutto per il venir meno della cosiddetta *range anxiety*, l'ansia di non aver abbastanza autonomia per compiere qualsiasi chilometraggio di cui si abbia necessità. Si potranno così gettare le basi per un ulteriore e fondamentale sviluppo della mobilità elettrica pura a zero emissioni.

In questo lavoro si porrà l'attenzione sullo stato dell'arte della tecnologia per quanto riguarda la sua applicazione dinamica, cioè di ricarica o alimentazione diretta dei veicoli in movimento, analizzando le soluzioni commerciali che sono già state sviluppate da parte di alcune importanti aziende (Bombardier, Qualcomm e WiTricity) e istituzioni (KAIST). Si procederà quindi con la progettazione di un sistema pensato per veicoli commerciali, quindi con potenze e capacità superiori rispetto ad una normale automobile, sia per quanto riguarda il sistema di trasmissione e ricezione, che la sua implementazione all'interno di un breve percorso.

Capitolo 1

Tecnologia

1.1 WPT

1.1.1 Evoluzione

Sebbene il principio fisico che sta alla base della trasmissione di potenza wireless sia noto da parecchio tempo, solo nell'ultimo decennio si può testimoniare un'effettiva ricerca e commercializzazione di prodotti che si basano su questa tecnologia. Ciò è dovuto a diversi motivi, in particolare alla necessità di rendere più ecosostenibile il settore dei trasporti e allo sviluppo delle tecnologie legate ai convertitori di potenza. Gli inverter ad alta frequenza sono la base su cui si fonda tutto il sistema di trasmissione e sono richiesti elevati standard di utilizzo ed efficienza.

In particolare uno dei primi esperimenti avvenuti con successo si è svolto alla UC Berkeley negli ultimi anni '70: esclusivamente a scopo di *concept*, si è sviluppato un prototipo di autobus da 60 kW e 35 posti che correva lungo un binario lungo 200 m e con una distanza dal suolo di 7 cm, tuttavia a causa della tecnologia di allora sull'elettronica di potenza a semiconduttori, il rendimento complessivo era di poco superiore al 50%.

Successivamente, al MIT di Boston nel 2007, è stata compiuta un'esperienza in cui si sono trasferiti 60 W di potenza per accendere una lampadina lungo una distanza di 2 metri con un'efficienza di circa il 60%. La differenza sostanziale rispetto agli esperimenti condotti in precedenza risiede nel fatto che è stato sviluppato un nuovo concetto a fondamento della tecnologia, basata ora sulla risonanza del sistema sorgente e ricevitore, in modo da minimizzare le interazioni che si hanno con l'ambiente esterno ed incrementare così notevolmente il rendimento su distanze ampiamente superiori. Inoltre, è stato svolto sulla *couple mode theory*: ciò ha permesso uno studio più accurato ed approfondito del fenomeno, con la possibilità di avere delle stime con cui confrontarsi.

Al giorno d'oggi tutti i sistemi sviluppati per il settore dei trasporti sono progettati basandosi sulla risonanza, tuttavia sono presenti moltissime soluzioni diverse a seconda delle necessità di cui l'applicazione ha bisogno. Si cercherà ora di dare una panoramica sulle molteplici sfaccettature che questa tecnologia ha assunto, partendo dalla teoria che le fa da presupposto.

1.1.2 Fondamenti teorici

Un tipico sistema di trasmissione è mostrato in figura 1, esso è composto da diverse parti più o meno complesse: dalla rete si raddrizza la corrente con un convertitore AC/DC generalmente non controllato, quindi con un inverter ad alta frequenza si produce la corrente per il settore dei trasporti a massimo 100 kHz. A questo punto si può inserire o meno un trasformatore di isolamento per ragioni di sicurezza, in modo da prevenire danni sul sistema di trasmissione vero e proprio formato da bobine, che vengono poste immediatamente a valle del trasformatore. Quindi la bobina al lato primario produce un campo, che viene raccolto dalla bobina sul lato secondario, dove viene indotta una tensione che viene successivamente raddrizzata e resa disponibile al sistema di controllo del pacco batterie.

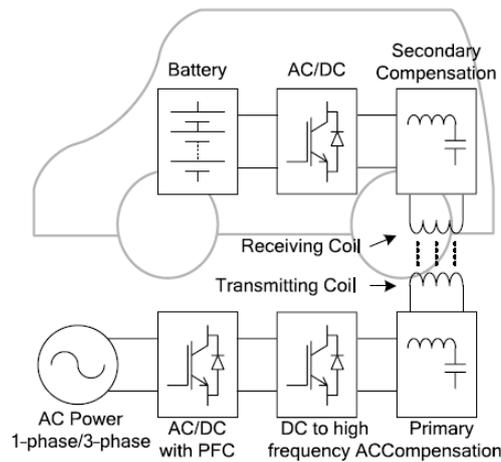


Figura 1.1: Sistema di trasmissione standard.

Il principio fisico che sta alla base del sistema è, come detto, l'induzione elettromagnetica: le bobine vanno a sostituire di fatto il trasformatore in un comune collegamento mediante cavo. In figura 1.2 è rappresentato il circuito semplificato, dove tutto l'apparato elettronico e di compensazione sono riuniti separatamente dal sistema di trasmissione vero e proprio.

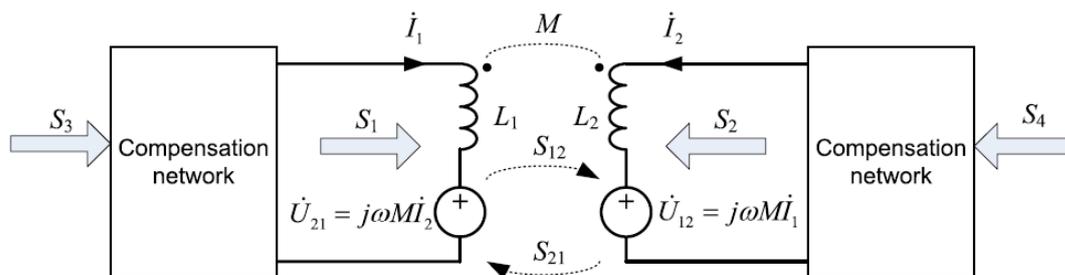


Figura 1.2: Schema circuitale semplificato.

L_1 e L_2 rappresentano le autoinduttanze al primario e al secondario, U_{12} e U_{21} sono le tensioni indotte dalla corrente primaria sul lato secondario e viceversa, direttamente proporzionali alla mutua induttanza M , e le S_i indicano le varie potenze apparenti disponibili in ogni preciso punto del circuito. In questo caso, trascurando le perdite resistive e magnetiche, le potenze in gioco sono pari a:

$$\dot{S}_{12} = \dot{U}_{12}\dot{I}_2^* = \omega MI_1I_2 \sin(\varphi_{12}) - j\omega MI_1I_2 \cos(\varphi_{12})$$

$$\dot{S}_{21} = \dot{U}_{21}\dot{I}_1^* = -\omega MI_1I_2 \sin(\varphi_{12}) - j\omega MI_1I_2 \cos(\varphi_{12})$$

dove le I_i sono i valori efficaci di corrente, ovviamente la potenza attiva è rappresentata dalla sola parte reale di quella apparente. In questo sistema la potenza può essere trasferita in entrambi i sensi, quindi si ipotizza che fluisca solamente da L_1 a L_2 , il massimo trasferimento si ha per $\varphi_{12} = \pi/2$ quando le correnti sono in quadratura. La potenza apparente totale in gioco risulta quindi:

$$\dot{S} = \dot{S}_1 + \dot{S}_2 = j\omega(L_1\dot{I}_1 + M\dot{I}_2)\dot{I}_1^* + j\omega(L_2\dot{I}_2 + M\dot{I}_1)\dot{I}_2^* = j\omega(L_1I_1^2 + L_2I_2^2 + 2MI_1I_2 \cos(\varphi_{12}))$$

che è tutta potenza reattiva Q .

Per un trasformatore tradizionale, la potenza reattiva in gioco equivale alla potenza magnetizzante, maggiore è maggiore sono le perdite nel rame e nel nucleo dello stesso, quindi per migliorare l'efficienza bisogna massimizzare il rapporto tra potenza trasferita P_{12} e potenza reattiva Q .

$$f(\varphi_{12}) = \frac{P_{12}}{Q} = \frac{\omega MI_1I_2 \sin(\varphi_{12})}{\omega(L_1I_1^2 + L_2I_2^2 + 2MI_1I_2 \cos(\varphi_{12}))} = \frac{k\sqrt{1 - \cos^2(\varphi_{12})}}{x + \frac{1}{x} + 2k \cos(\varphi_{12})}$$

con $\pi/2 < \varphi_{12} < \pi$, $x = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \frac{I_1}{I_2} > 0$ e k coefficiente di accoppiamento tra le bobine.

Per ottenere la massimizzazione, si pongano dunque la derivata prima e seconda rispetto a φ_{12} uguale e minore di zero. La soluzione che si ottiene dipende sia dal coefficiente x che da quello k :

$$\cos(\varphi_{12}) = -\frac{2k}{x + \frac{1}{x}}, \quad \sin(\varphi_{12}) = \sqrt{1 - \frac{4k^2}{(x + \frac{1}{x})^2}}$$

Nel caso di un trasformatore tradizionale sia k che x sono circa uguali a 1, a meno delle perdite, mentre lo sfasamento tra le correnti è quasi pari a π , in opposizione di fase dunque. Considerando un apparato WPT invece si ottiene $k \simeq 0$, il quale porta ad avere le correnti in quadratura che di conseguenza massimizza il trasferimento di potenza, come illustrato in precedenza. Qui si può notare la differenza nel comportamento nei due diversi casi che sorge tra bobine strettamente e scarsamente accoppiate tra loro, avendo una differenza di sfasamento di praticamente 90° . Il grado di accoppiamento del sistema influenza, inoltre, anche la progettazione della rete di compensazione associata al sistema di trasmissione. Ci sono due principali linee guida da seguire per dimensionare i condensatori: la prima consiste nel farlo risuonare con l'induttanza di dispersione, mentre la seconda con l'autoinduttanza della bobina. I risultati ottenuti sono sostanzialmente differenti in quanto con il primo metodo di compensazione si

raggiunge un maggior rapporto $f(\varphi_{12})$, quindi una miglior efficienza, mentre nell'altro caso si va a massimizzare la potenza trasmessa in funzione della corrente di bobina.

Nella pratica la discriminante da utilizzare è k , se è maggiore o minore di 0,5, valore raggiungibile solitamente attraverso l'utilizzo di nuclei in ferrite. Se è superiore, è importante incrementare il valore del rapporto per migliorare l'efficienza dell'intero sistema, anche se le perdite di magnetizzazione potrebbero aumentare significativamente. In questo caso, compensando l'induttanza di dispersione, si ottiene un comportamento simile a quello di un trasformatore tradizionale, tuttavia l'intero sistema non lavora in modalità di risonanza vera e propria.

Se è minore di 0,5, come nel caso di ricarica per veicoli elettrici, si cerca di ottenere il massimo trasferimento di potenza disponibile a parità di corrente e, di riflesso, di pesi e ingombri delle bobine. In questo caso il campo magnetico è quasi completamente compreso nello spazio tra le due bobine e le perdite dovute all'isteresi nella ferrite sono trascurabili rispetto a quelle magnetizzanti, mentre quelle nel rame sono proporzionali al quadrato della corrente. Per diminuirle il più possibile sono necessarie alcune considerazioni: come già detto, le due correnti devono essere sfasate di $\pi/2$ e al secondario \dot{U}_{12} deve essere in fase con \dot{I}_2 , avendo un comportamento esclusivamente resistivo, mentre al primario deve essere contemporaneamente minimizzata la potenza in ingresso \dot{S}_3 . Ponendo $\varphi_{12} = \pi/2$, la potenza apparente da trasmettere risulta:

$$\dot{S}_1 = j\omega L_1 I_1^2 + \omega M I_1 I_2$$

Idealmente al primario, la compensazione dovrebbe cancellare la parte immaginaria di \dot{S}_1 e rendere $S_3 = \omega_0 M I_1 I_2$, con ω_0 frequenza di risonanza del sistema. Per questo si nota che, data una certa potenza trasmessa, è necessario rendere il secondario risonante per diminuire la potenza apparente in gioco, che riduce di conseguenza tutte le potenze di dimensionamento sia delle bobine sia della parte di elettronica di potenza. Si vuole trasmettere quindi alla frequenza di risonanza.

Si può ora calcolare il rendimento ottenuto tra le due bobine del sistema partendo dalla tensione:

$$U_{12} = I_2(R_2 + R_{Le}) = \omega M I_1 = \omega k \sqrt{L_1 L_2} I_1$$

con R_2 resistenza della bobina al secondario e R_{Le} resistenza del carico equivalente. Si definiscono quindi i fattori di qualità per entrambi i lati $Q_i = \omega L_i / R_i$, da cui l'efficienza

$$\eta = \frac{R_{Le} I_2^2}{R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_{Le} I_2^2} = \frac{R_{Le}}{\frac{(R_2 + R_{Le})^2}{k^2 Q_1 Q_2 R_2} + R_2 + R_{Le}} = \frac{1}{\frac{a + \frac{1}{a} + 2}{k^2 Q_1 Q_2} + \frac{1}{a} + 1}$$

ottenuto ponendo $a = R_{Le}/R_2$, che massimizzato rispetto alla variabile a risulta:

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2}$$

per $a_{\eta max} = \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}$. Questa trattazione è valida per qualsiasi genere di compensazione al fine di valutare le performance del sistema e raggiungere il massimo rendimento possibile.

Nelle applicazioni di ricarica per veicoli, la batteria è solitamente connessa mediante un raddrizzatore a ponte non controllato a diodi, che necessita di un minimo di potenza reattiva per funzionare correttamente: questa può essere fornita da uno tra la bobina o il sistema di compensazione. La batteria può essere resa equivalente ad una resistenza tramite la relazione $R_b = U_b/I_b$, se è collegata direttamente al raddrizzatore bisogna considerare l'equivalente in corrente alternata $R_{ac} = 8R_b/\pi^2$.

Per la carica di veicoli elettrici fermi il coefficiente di accoppiamento risulta circa 0,2 solitamente e con dei fattori di qualità non troppo elevati, circa 300, si riesce ad ottenere un rendimento teorico del 96,7%.

1.2 Design del sistema

Per trasferire potenza senza fili si necessita di almeno due bobine magneticamente accoppiate, una al lato sorgente (primario) e una al lato ricevente (secondario). A seconda delle applicazioni, il primario può essere progettato sia sotto forma di *pad* che di veri e propri binari magnetici, con elevati coefficienti k e fattori di qualità Q . Generalmente, per una struttura data, maggiore è il rapporto della dimensione dei pad rispetto alla distanza, maggiore sarà k ; più spessi sono il filo e l'eventuale nucleo in ferrite, migliore sarà il Q . La difficoltà risiede nel trovare il giusto compromesso tra dimensioni e costi del sistema e la sua efficienza.

Il fattore di qualità è influenzato proporzionalmente dalla frequenza di risonanza scelta, tuttavia questa non può essere troppo grande per due principali ragioni. La prima riguarda la velocità di commutazione che dovrebbero assumere i componenti dell'elettronica a potenze considerevoli, decine di kW, l'altra riguarda invece l'emissione di onde elettromagnetiche potenzialmente pericolose per gli esseri viventi. I primi prototipi utilizzavano frequenze di 180 Hz, poi, grazie ai progressi tecnologici nei semiconduttori, si sono potuti raggiungere agevolmente i 20 ÷ 150 kHz, attuale intervallo nella quale operano i sistemi per i veicoli elettrici, non causando nessuna emissione elettromagnetica pericolosa. Queste frequenze necessitano l'impiego del filo di Litz al fine di minimizzare le perdite e l'effetto pelle, molto marcato in questi casi.

Il fattore di qualità, tuttavia, è fortemente influenzato dal design delle bobine, che risulta essere l'elemento principe per ottenere i migliori rendimenti, quindi la geometria delle stesse deve essere curata con particolare attenzione per ottimizzare l'intero sistema di trasmissione.

1.2.1 Carica stazionaria

Agli albori di questa tecnologia le bobine utilizzate erano costituite da semplici nuclei di trasformatori opportunamente divisi, ma ciò non garantiva la trasmissione oltre a spazi veramente esigui. Per ovviare questo problema si è ricorso a diverse soluzioni, giungendo infine a quello che rappresenta lo standard moderno della tecnologia: il pad.

I vari sistemi di bobine accoppiate possono essere suddivisi in base alla distribuzione del flusso magnetico nell'area di interesse a seconda che sia *single* o *double sided*. Per il *double sided*, il flusso raggiunge entrambi i lati della bobina, come può accadere per

solenoidi planari. Quindi, è necessario aggiungere uno strato, solitamente di alluminio, per schermare il telaio e prevenire l'insorgere di correnti parassite oltre a garantire la sicurezza all'interno del veicolo stesso. Questo, tuttavia, provoca l'insorgere di perdite aggiuntive dell'1 ÷ 2% e l'abbassamento del fattore di qualità in modo considerevole e perciò questa tipologia non rappresenta la soluzione adatta per la WPT.

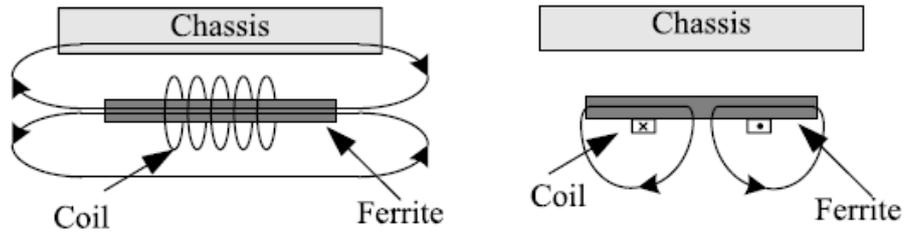


Figura 1.3: Single e double sided couplers.

Come in figura, nel *single sided* la maggior parte delle linee di flusso fluiscono attraverso la ferrite, a differenza del precedente caso, e il flusso è confinato principalmente su uno solo dei due lati, mentre nell'altro è presente una minima parte di flusso disperso. Questo rende minore la necessità di schermare con alluminio il sistema ricevente e l'isolamento risulta sede di molte meno perdite. Le geometrie utilizzate per questi *pad* sono molteplici e variegata tra loro: si passa da quella circolare a quella rettangolare semplice, giungendo a forma di doppia "D" e fino a quella denominata DDQ, ognuna con caratteristiche di accoppiamento diverse che lo garantiscono in condizione di non perfetto allineamento. In ogni caso son sempre presenti tre strati: quello superiore è il conduttore, solitamente in rame, in mezzo è posto lo spessore di ferrite per guidare più efficacemente il flusso e alla fine lo strato di alluminio per la schermatura. Quest'ultimo ha la proprietà di confinare il campo magnetico ad alta frequenza solo nello spazio tra le due bobine, rendendo altamente efficiente il sistema.

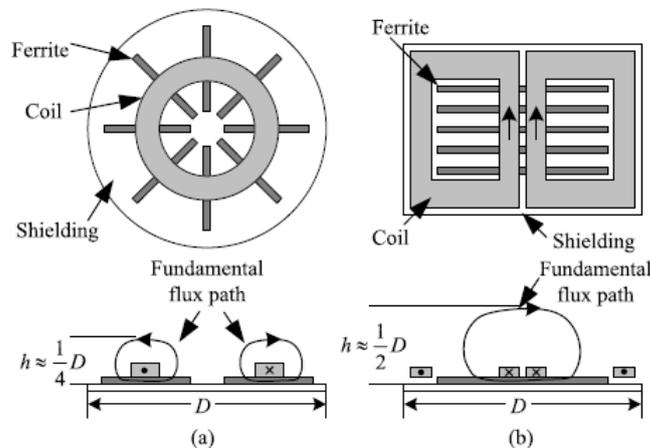


Figura 1.4: (a) Pad circolare. (b) DD pad.

DD pad Le due bobine sono collegate tra loro elettricamente in parallelo e magneticamente in serie. Infatti, considerando le parti adiacenti delle due D come un tubo di flusso che permette di canalizzare il flusso stesso lungo la massima dimensione della ferrite, si massimizza l'altezza delle linee di flusso, mantenendo minima l'induttanza. Si ottiene quindi che l'altezza del flusso per il caso circolare è circa un quarto del diametro, mentre nel DD pad raggiunge circa la metà della larghezza del *pad*. Quindi a parità di dimensioni con la tipologia a doppia D si raggiungono significanti miglioramenti nella distanza tra le due bobine, oltre a raddoppiare di fatto l'area compresa e ottimizzare quindi, con costi similari, l'investimento.

I nuclei di ferrite sono disposti perpendicolarmente alla direzione della corrente al fine di garantire che nessuna forza magnetomotrice sia indotta sul retro del pad e garantire, allo stesso tempo, la minore riluttanza sul circuito magnetico. Oltre a questo il DD pad raggiunge una buona tolleranza lungo l'asse *y*, potendo sostenere così la maggiore criticità della ricarica in movimento del veicolo.

DDQ pad Tuttavia, è presente un punto di annullamento a circa un terzo della larghezza lungo l'asse *x*, a causa della polarizzazione presente e della non simmetria, come nel caso di bobine circolari. Infatti, in questa particolare posizione, il flusso entra ed esce dalla stessa D, non inducendo perciò nessuna tensione al secondario. Questo può essere evitato mediante l'aggiunta di una terza bobina denominata Q a cavallo della doppia D e sotto di essa per non avere accoppiamento magnetico con la stessa. Inoltre, per aumentare l'accoppiamento con la terza bobina, è necessario allungare i nuclei di ferrite fino a farli protendere al di fuori delle D. Dal punto di vista circuitale, le due bobine doppia D e Q sono collegate ognuna mediante un proprio gruppo raddrizzatore e, solamente dopo, unite insieme; inoltre, esse sono sintonizzate indipendentemente con la sorgente accoppiata.

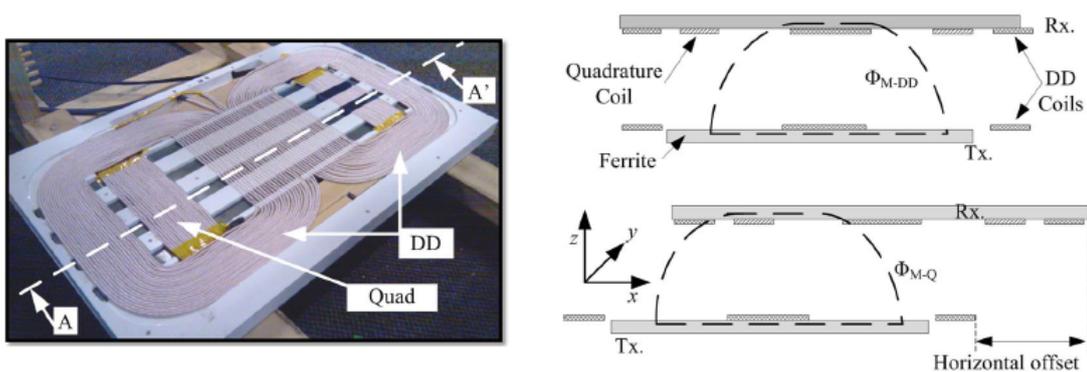


Figura 1.5: (a) DDQ pad (b) Flussi concatenati nei due casi.

Ponendo la tipologia DD come sorgente e DDQ come riceptrice si riesce a garantire un'area utile alla carica di ampiezza fino a 5 volte superiore rispetto alle bobine circolari, tuttavia a causa della Q si giunge a raddoppiare la quantità di rame necessaria. Una variante del DDQ pad è stata proposta e nominata *bipolar pad*: consiste nell'aumentare le dimensioni delle D fino ad ottenere una sovrapposizione delle stesse per simulare la Q,

risparmiando così il 25% di rame rispetto all'originale. Il coefficiente di accoppiamento raggiunge così valori tra $0,15 \div 0,30$ e possono essere ottenute efficienze superiori al 90%.

1.2.2 Ricarica in movimento

La ricarica dinamica è un metodo per alimentare i veicoli elettrici durante la marcia degli stessi, è chiamata anche OLEV (OnLine Electric Vehicle) ed è fondamentale nel processo dell'eliminazione della *range anxiety*, causa principale della difficoltà ad affermarsi sul mercato di questi automezzi. Il sistema è formato da un apparato ricevitore posto sotto allo *chassis* del veicolo e da un emettitore interrato nel manto stradale, prevenendo così qualsiasi atto di vandalismo. Esistono due principali vie per quella che, di fatto, è una vera e propria alimentazione del veicolo, come un classico pantografo: il primo è rappresentato da una linea continua di trasmissione e il secondo dall'implementazione in serie dei pad utilizzati per la carica stazionaria.

La linea può essere costituita semplicemente da due conduttori oppure può adottare dei nuclei in ferrite di diversa forma, U, W o I, al fine di canalizzare al meglio il flusso. In figura sono mostrate le due tipologie e la loro diversa configurazione. La distanza massima per la trasmissione di potenza e il disallineamento sostenibile sono determinati dalla distribuzione dell'area della ferrite a W, quindi la totale larghezza della stessa dovrà essere almeno 4 volte la distanza dal pad ricevitore.

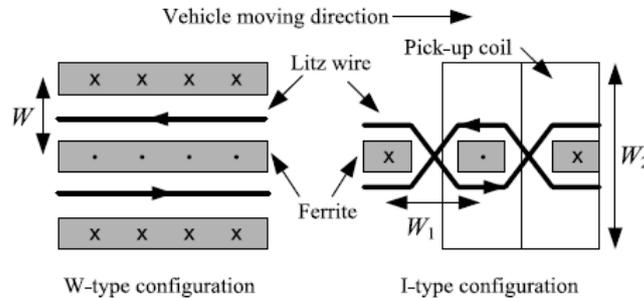


Figura 1.6: Configurazione a W e I della ferrite.

Inoltre, per la configurazione ad I si predispone l'alternanza tra i poli magnetici, come in figura 1.6. La distanza interpolare W_1 è ottimizzata al fine di garantire il miglior accoppiamento possibile per una certa distanza, mentre l'ampiezza del pad ricevitore W_2 è progettata per sostenere il disallineamento laterale. Non esiste relazione tra la larghezza della linea di alimentazione e la distanza di trasferimento, quindi la linea stessa può essere costruita al fine di minimizzare lo spazio occupato nella carreggiata, anche perché il pad non può superare come dimensioni la larghezza del veicolo. Infatti il sistema, con simili potenze trasferite e disallineamenti possibili, presenta larghezze di 140 e 80 cm per le forme U e W della ferrite, mentre viene ridotto a soli 10 cm per la tipologia ad I. Questo permette di posizionare più lontano dal bordo strada il sistema, garantendo così un'esposizione minore alle onde elettromagnetiche ai pedoni, a prescindere dalla schermatura che sarà presente.

Questa tipologia di alimentazione presenta tuttavia un importante problema di efficienza: solo una minima parte del percorso è interessata dall'interazione con il ricevitore, che conduce ad un coefficiente di accoppiamento molto basso. Questo causa inoltre anche problemi relativi all'interferenza elettromagnetica. Per sopperire a queste problematiche si può dividere il percorso in più segmenti dotati ognuno di un proprio inverter e un sistema di rilevamento e di accensione/spegnimento. Si diminuisce così il campo magnetico lungo i segmenti inattivi, anche se non viene risolto il problema dei cavi percorsi da corrente ad alta frequenza che abbattano l'efficienza dell'intero apparato di trasmissione, non paragonabile al caso stazionario.

Il continuo accorciamento dei segmenti porta così alla seconda soluzione: il posizionamento contiguo dei pad lungo la carreggiata, dove ognuno di essi può essere pilotato singolarmente, senza la necessità di lunghi cavi percorsi da corrente ad altissima frequenza. Questo inoltre permette di confinare il campo tra i due apparati, senza la necessità di particolari schermature per proteggere i pedoni e l'ambiente circostante, oltre ad ottenere dei risultati simili alla carica stazionaria. Tuttavia il costo dell'intero sistema così risulterebbe insostenibile, per diminuirlo si può utilizzare un solo convertitore per diversi pad e pilotare gli stessi in corrente. Un'alternativa si ottiene fornendo ad ogni pad un interruttore bidirezionale e un accoppiamento intermedio, che agisce come sorgente di corrente ad alta frequenza, controllando il duty cycle dello switch. Questa soluzione è chiamata *double couple system* e per assicurare un rendimento accettabile consiste in due diversi tipi di accoppiamento, il primo tra primario e intermedio forte e il secondo tra intermedio e secondario debole. Il primo stadio, sotterrato nella strada, può anche essere isolato galvanicamente per maggior sicurezza, presenta un $k = 0,9$ grazie alla ferrite di forma toroidale che viene inserita. Inoltre, variando il rapporto spire tra primario e intermedio si può diminuire la corrente circolante in quest'ultimo, nel caso studio di un quarto. Il secondo stadio invece vede interfacciarsi un DD pad con un DDQ pad al fine di ottenere i miglioramenti già visti in precedenza. Tutto il sistema viene controllato in onda quadra e i due interruttori sono aperti e chiusi alternativamente, tuttavia, anche con questi accorgimenti, si presenta il problema che quando l'interruttore è spento, la corrente circola ugualmente nell'accoppiamento intermedio, diminuendo così l'efficienza complessiva.

È stata proposta un'idea basata sul contenimento di campo riflesso nella quale tre pad sono pilotati da un solo convertitore. Da un'attenta progettazione dei parametri delle bobine, il campo riflesso nel ricevitore può far insorgere una corrente sulla sorgente, che dipende dalle condizioni di accoppiamento ed è presente esclusivamente quando vi è accoppiamento. Non appena decade questa condizione, la corrente decresce rapidamente a zero. Per rendere questo metodo meno soggetto alle variazioni del coefficiente di accoppiamento, molto ampie nel caso di ricarica dinamica, è necessario condurre ulteriori studi.

1.3 Circuito di compensazione

Come visto in precedenza, in un sistema di trasmissione di potenza wireless, i pad sono debolmente accoppiati tra loro ed è presente una grande induttanza di dispersione. Al

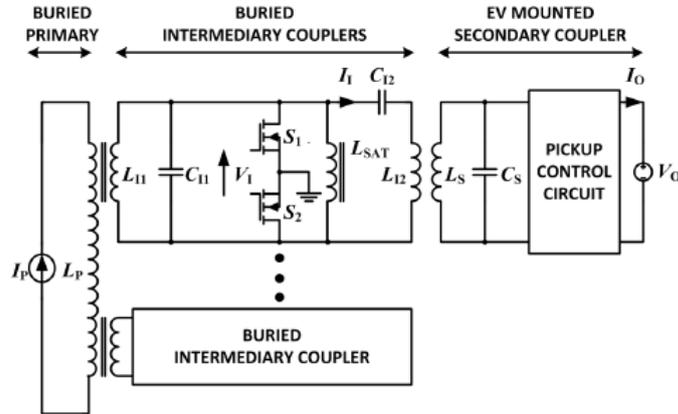


Figura 1.7: Sistema con intermediario.

fine di diminuire la potenza di dimensionamento dei singoli componenti, è necessario usare una rete di compensazione. Nei primi dispositivi, la compensazione era presente solo su uno dei due lati, tuttavia per coefficienti d'accoppiamento minori di 0,3 è raccomandato porla su entrambi, primario e secondario, per ottenere caratteristiche migliori e più flessibili. Il metodo più semplice per compensare l'induttanza di dispersione è aggiungere dei condensatori e in base a come viene collegato si ottengono quattro diverse tipologie: serie-serie, serie-parallelo, parallelo-serie e parallelo-parallelo. Se il primario è compensato in serie, la bobina può essere direttamente collegata al convertitore che funge da generatore di tensione. Mentre se è in parallelo, è necessario aggiungere un'induttanza delle dovute dimensioni per poter considerare il convertitore come un generatore di corrente. Sul lato secondario, generalmente C_2 viene dimensionato per risuonare con L_2 , minimizzando così la potenza apparente circolante. Quando il primario è percorso da una corrente costante, la tipologia di compensazione al secondario determina se il generatore sarà di tensione, nel caso in cui sia in serie, o di corrente, nel caso in cui sia in parallelo. Tuttavia, non tutti i sistemi WPT sono a corrente costante sul primario, quindi possono emergere alcune differenze negli altri casi qui non esaminati.

Per ridurre la potenza apparente, il condensatore al primario è progettato per mettere in fase la tensione e la corrente di input per un certo grado di accoppiamento e carico questo metodo è chiamato *zero-phase-angle method* (ZPA). Un'altra soluzione cercata per non sovraccaricare gli switch e minimizzare le perdite di commutazione è quella di regolare il condensatore in modo da mantenere una piccola parte di potenza reattiva al primario e realizzare la condizione di *soft switching*, di tensione o di corrente. In questo secondo caso, si ottengono parametri molto vicini al metodo ZPA, in quanto la potenza reattiva in gioco è veramente esigua.

Per calcolare la capacità necessaria al primario, si inizia definendo i fattori di qualità del secondario, calcolati come rapporto tra potenza reattiva e attiva: $Q_{ss} = \omega_0 L_2 R_L$ se compensato in serie, $Q_{sp} = R_L \omega_0 L_2$, se in parallelo. I risultati ottenuti per il metodo ZPA sono elencati in tabella.

Si possono effettuare delle importanti considerazioni sulla base delle relazioni ri-

Topology	Primary Capacitance C_1
SS	$\frac{C_2 L_2}{L_1}$
SP	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1}{1-k^2}$
PS	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1}{Q_s^2 k^4 + 1}$
PP	$\frac{C_2 L_2}{L_1} \cdot \frac{1-k^2}{Q_s^2 k^4 + 1-k^2}$

cavate. Per la compensazione serie-serie, la capacità da inserire non dipende dalle condizioni di accoppiamento e di carico ed è costante; il metodo serie-parallelo, invece, è affetto dal solo accoppiamento tra i pad. Mentre, se al primario la compensazione avviene in parallelo, la capacità dipende sia dal carico che dal coefficiente k . Quando il secondario si trova alla frequenza di risonanza si può calcolare il carico riportato sul lato primario a seconda della tipologia di compensazione presente:

$$R_{r_{ss}} = R_{r_{ps}} = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}$$

$$R_{r_{sp}} = R_{r_{pp}} = \frac{M^2 R_L}{L_2^2}$$

Per la compensazione serie-serie, si può notare che quando diminuisce l'accoppiamento, anche la resistenza riportata diminuisce, questo va ad aumentare la corrente in uscita se è connesso ad un generatore di tensione. Per quella parallelo-serie, invece, la resistenza varia con la stessa dipendenza da k . Tuttavia, poiché la potenza in uscita diminuisce al decrescere dell'accoppiamento, dovrebbe essere collegata ugualmente ad un generatore di corrente.

1.3.1 Compensazione SPS

Per mantenere costante la potenza trasmessa è stata studiata una compensazione SPS (serie-parallelo-serie), come combinazione di quella serie-serie e parallelo-serie. Progettando secondo un corretto rapporto i due condensatori sui lati opposti, si ottiene un sistema con le caratteristiche di entrambi gli originali e ottime proprietà di tolleranza del disallineamento, senza controllo della potenza al primario.

Per scegliere le dimensioni delle diverse capacità, si inizia determinando $C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2}$, in modo da compensare completamente L_2 . Dopodiché, basandosi sulla tipologia PS, si calcola la capacità $C_{3PS} = \frac{L_2 C_2}{L_1 + \frac{M^4}{L_1 L_2 C_2 R_L^2}}$, così facendo il sistema visto dal primario opera in risonanza, in caso di valori minori, invece, avrebbe un comportamento induttivo. Ponendo $\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_r$, con \dot{Z}_1 l'impedenza al primario e \dot{Z}_r quella del secondario

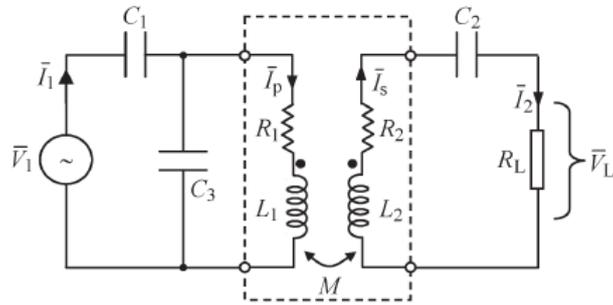


Figura 1.8: Sistema di compensazione SPS.

riportata al primario, l'impedenza complessiva, escluso C_1 risulta:

$$\dot{Z}_{TPS} = \frac{\dot{Z}_{11}}{1 + \dot{Z}_{11}j\omega_0 C_3}$$

Il comportamento ai disallineamenti è fortemente influenzato dalla capacità C_3 , che è definita come $C_3 = K_C C_{3_{PS}}$, con $K_C < 1$. Utilizzando questa capacità, la parte immaginaria di \dot{Z}_{TPS} non è più nulla: si ricava infine $C_1 = \frac{1}{\omega_0} \Im \left\{ \dot{Z}_{TPS} \right\}$, ottenuta annullando l'esigua parte non risonante. La scelta del K_C viene fatta dal compromesso tra il massimo disallineamento ottenibile e la massima potenza trasferibile dal sistema, ponendolo pari a 1 si ricade nella tipologia PS. Per ottenere maggiori disallineamenti bisogna diminuire il coefficiente ed è necessario sovradimensionare i pad, rispetto alla loro potenza nominale: con $K_C = 0,85$, si ottengono disallineamenti possibili del 40% con rapporti tra le potenze prossimi all'unità.

1.3.2 Compensazione parallelo

In questo tipo di applicazioni e nel riscaldamento induttivo, è largamente usato un sistema LCL poiché riesce a garantire un comportamento da generatore di corrente alla frequenza di risonanza. La corrente al primario è pilotata dal convertitore attraverso una forma d'onda quadra ad alta frequenza, senza essere influenzata dalle condizioni di accoppiamento e di carico, rendendo così molto più semplice il controllo. Inoltre, attraverso una compensazione più aggressiva, tutta la potenza reattiva può essere rifasata, minimizzando quella di dimensionamento. Tuttavia, un sistema compensato in parallelo è affetto da una grande corrente reattiva nella bobina ricevente e, quindi, da una massiccia potenza reattiva riflessa al primario. Per risolvere questo problema, è stato proposto un sistema LCL da implementare al secondario, facendo diventare così il fattore di potenza unitario e trasferendo solo potenza attiva nell'apparato. Un ulteriore aggiustamento può essere fatto, introducendo una seconda capacità (LCLC) al fine di cancellare gli effetti non lineari dei diodi raddrizzatori, raggiungendo esattamente 1 come power factor, in determinate condizioni di carico. Le differenze tra i due metodi sono, in ogni caso, minime poiché entrambi raggiungono efficienze di molto superiori al tradizionale risonatore LC.

1.3.3 Strategie di controllo

Normalmente, la sorgente di potenza controlla sia la frequenza che la corrente che fluisce al primario e si possono utilizzare sia controlli fissi che variabili per ognuna grandezza. La regolazione del flusso di potenza è necessaria, vista la variabilità delle condizioni di carico e accoppiamento. Un primo metodo di controllo consiste nel variare la frequenza di alimentazione, tuttavia esso non è applicabile in caso di ricevitori multipli, che potrebbero non essere in grado di trasferire la necessaria potenza. Un approccio alternativo è rappresentato dall'utilizzo del controllo dello switch al secondario, controllando così singolarmente ogni ricevitore, aumentando però le perdite e il costo del sistema. Considerando invece un controllo a frequenza costante, la variazione di potenza è mediata dalla variazione della fase tra i due lati del sistema, tuttavia questa causa dei sovradimensionamenti importanti di tutto l'apparato. L'ultima tipologia è il controllo a frequenza variabile, tuttavia se l'operatività in ZPA si sposta troppo dalle condizioni nominali si assiste ad un decadimento della capacità di trasmissione e alla stabilità della frequenza stessa.

Nei veicoli elettrici è necessario che il sistema sia in grado di funzionare a diversi gradi di accoppiamento, come può essere in un apparecchio domestico o in strada, sepolto sotto alcuni strati di materiale. Risulta quindi essenziale, l'implementazione di un controllo sui fattori di qualità Q_1 e Q_2 , su entrambi i lati del sistema per ottenere un'ottimizzazione delle prestazioni. In particolare, questo è richiesto nella trasmissione dinamica della potenza poiché, una volta fissato il Q_1 in base al veicolo che ci si aspetta di alimentare, si controlla la potenza tramite il secondario. Il coefficiente k può variare tra $0,4 \div 0,1$, in base alle differenti condizioni di funzionamento tra i due pad, variando di molto, a parità di fattore di qualità, la potenza apparente richiesta. Una volta fissata al primario la condizione di funzionamento, ogni variazione di k incide sulla potenza assorbita al primario, aumentando di conseguenza le perdite associate. Nella pratica, l'incremento di un ΔQ su entrambi i lati, incrementa le perdite assolute negli stessi e riduce la banda di risonanza in funzionamento, rendendo il sistema più sensibile ai cambiamenti. Perciò è consigliabile ridurre le variazioni dei fattori di qualità alla decina come ordine di grandezza, per poter controllare le perdite e la sensibilità del sistema.

1.4 Elettronica di potenza

In un sistema di trasmissione, la funzione principale di generazione di tensione e corrente è espletata dai convertitori ad alta frequenza. La progettazione di questi componenti risulta molto sfidante per diverse ragioni, poiché questi vanno ad influenzare pesantemente a cascata tutte le componenti del sistema di trasmissione. Solitamente, per incrementare la frequenza di switching e l'efficienza si adottano convertitori risonanti o di classe-E. Gli interruttori individuati per funzionare a frequenze inferiori al centinaio di kHz sono gli IGBT, mentre per valori superiori è necessario passare ai MOSFET, più performanti e costosi. Al lato primario è solitamente presente un sistema formato da raddrizzatore più inverter ad alta frequenza per poter indurre la tensione nell'apparecchio ricevitore. Nel secondario, invece, viene utilizzato un raddrizzatore AC/DC

per ottenere una corrente continua con cui alimentare il sistema di batterie e questa può essere ulteriormente trasformata con un successivo stadio di conversione qualora siano presenti esigenze particolari.

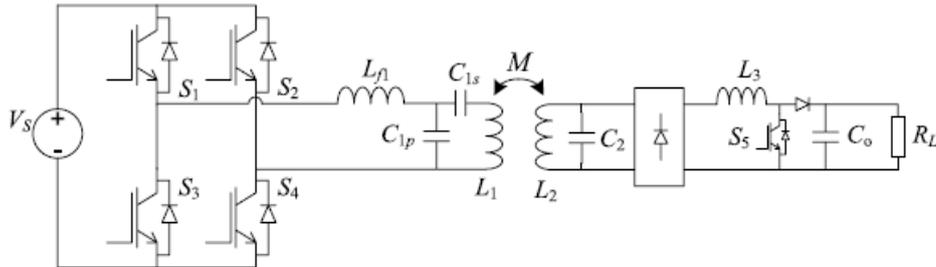


Figura 1.9: Circuito di conversione.

In figura 1.9 è mostrata una soluzione standard per questo genere di applicazioni: al primario, il convertitore genera una tensione ad onda quadra e, adottando un circuito di compensazione LC, riesce a mantenere una corrente ad alta frequenza su L_1 . Si può eventualmente aggiungere un condensatore C_{1s} per compensare una parte della potenza reattiva utilizzata dall'induttanza, per diminuire la potenza apparente circolante su L_{f1} e aumentare la flessibilità del sistema. Il secondario invece, utilizzando una compensazione in parallelo, agisce come un generatore di corrente. Infatti, con un certo accoppiamento, la corrente in L_3 si può considerare costante e quindi, operando sul duty cycle di S_5 , si riesce a controllare la potenza trasmessa. Una grande varietà di soluzioni è stata proposta per controllare questo parametro e si possono stabilire delle tipologie sulla base del lato sul quale è operato il controllo: primario, secondario o entrambi. Nella maggior parte dei casi, l'applicazione al primario o su entrambi i lati è utilizzabile esclusivamente per il trasferimento di potenza tra due soli pad. Mentre con il controllo al secondario è possibile raggiungere la trasmissione da una sorgente, che può essere un pad o una linea, a diversi apparati ricevitori.

Per effettuare il controllo al primario si possono modificare diverse variabili come la frequenza, il duty cycle e lo sfasamento tra le due gambe del ponte intero. Dal momento che i convertitori risonanti sono relazionati con la frequenza di utilizzo, alcune soluzioni si basano sul controllo della frequenza stessa. Tuttavia, modificandola, si può notare il fenomeno della biforcazione nei sistemi scarsamente accoppiati e, quindi, la potenza in funzione della frequenza non è sempre monotona, causando così diversi problemi nel controllo. Inoltre, questa tipologia utilizza un più ampio spettro di radiofrequenze, che può aumentare il rischio di interferenze elettromagnetiche. Fissata per queste ragioni la frequenza di commutazione, si può operare il controllo attraverso la regolazione del duty cycle o dello sfasamento. Queste tipologie però presentano però un'elevata corrente che fluisce attraverso il convertitore e inoltre possono far perdere al sistema le condizioni di *zero-switching* (ZVS e ZVC). Per assicurare la ZVS sono stati proposti due metodi: il primo consiste nel controllare la potenza attraverso la tensione continua di input V_S , mentre il secondo utilizza un metodo di cancellazione asimmetrico della tensione con un diverso controllo del duty cycle, ampliando la regione di ZVS.

Al secondario può essere inserito un convertitore boost successivamente al raddrizzatore e, inoltre, se il controllo è posto dopo il raddrizzamento è necessaria l'introduzione di un'induttanza che funzioni come diodo per la corrente. Se è presente invece una compensazione serie, ideale per alimentare la maggior parte dei carichi, si manifesta una particolare difficoltà a regolare la tensione in uscita senza l'utilizzo di un convertitore che, quindi, è necessario. Il controllo al secondario, utilizzato quando sono presenti molteplici ricevitori, induce nel primario piccole variazioni sulla corrente fissata sia in ampiezza sia in frequenza.

Un primo metodo utilizzato è quello di adottare un controller che modifica il circuito risonante aggiungendo reattanza, da un induttore, per controllare la potenza. Questo, tuttavia, non lavorando nella zona lineare B-H, è difficile da costruire in quanto dovrebbe gestire correnti ad alta frequenza senza saturare completamente e, inoltre, abbassa l'efficienza dell'intero sistema. Una soluzione più comune consiste nel disaccoppiare il carico, attraverso un buck converter, quando la domanda di potenza è bassa. Il convertitore assicura un'adeguata precisione nella tensione in uscita e permette un'ottima regolazione della stessa anche con variazioni del carico. Ci sono però alcuni svantaggi tra cui l'incapacità di limitare la corrente di *inrush* nella compensazione serie e il doppio stadio di conversione necessario che abbassa il rendimento, oltre al maggior costo che ciò comporta. Un'ultima proposta studiata consiste nel condensare tutto in un unico stadio di conversione AC/DC, con la condizione ZCS, che presenta la capacità di limitare la corrente in entrata.

Il controllo dual-side è una combinazione di entrambi i metodi proposti, esso provoca un'elevata complessità e costo dell'intero sistema a fronte, però, di un'efficienza irraggiungibile singolarmente con le altre tipologie proposte.

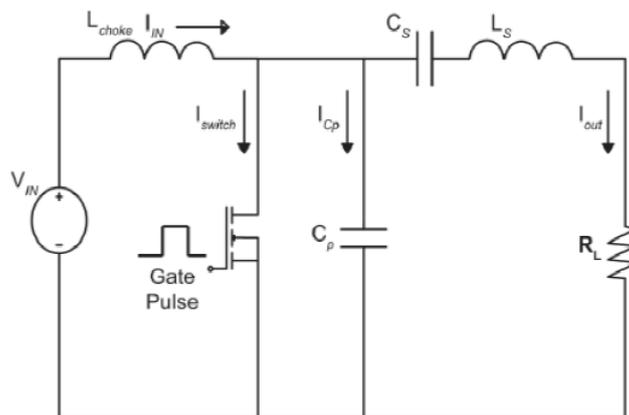


Figura 1.10: Circuito di un convertitore classe E.

Un'alternativa è rappresentata dai convertitori di classe E e DE a singolo switch, che sono utilizzabili per potenze fino a diversi kilowatt, si basa sulla risonanza tra C_S e L_S , che permette il funzionamento ad alte frequenze. Selezionando accuratamente i parametri del circuito per il classe E, si può raggiungere, oltre alla condizione di ZVS, anche quella di ZdVS, con derivata nulla della tensione. Il controllo del sistema viene

effettuato attraverso la tensione di input, il duty cycle o la frequenza di switching. Il principale difetto di questa tipologia di inverter è il picco di tensione a cui viene sottoposto l'interruttore, superiore anche di tre volte rispetto a quella di alimentazione. Altre preoccupazioni sono rappresentate dal lavoro sotto carico di questo componente, che viene messo sotto pressione anche dalle perdite, abbastanza importanti a questi livelli di potenza, oltre che dalla tensione.

Per quanto riguarda la classe DE, si presta maggiormente all'utilizzo poiché possiede un maggior range di frequenze di utilizzo a potenze paragonabili, anche se con una minor distanza di trasmissione (200÷300 mm). Viene ottenuta da un ibrido tra le due classi e, per questo, non può funzionare in modalità ZVS e la massima tensione applicabile è pari a quella continua in input. Il sistema ricavato è quindi molto complesso e necessita di un raffinato lavoro di compensazione e studio della dinamica.

1.5 Altre considerazioni

1.5.1 Metodi di studio

La trasmissione di potenza wireless coinvolge diverse discipline ingegneristiche come elettronica di potenza, magnetismo, elettrotecnica e molte altre, quindi è un sistema multidisciplinare molto complesso da studiare. Solitamente lo studio viene svolto come segue:

1. Studio analitico, che include l'analisi circuitale e il calcolo delle varie induttanze;
2. Analisi dei campi, utilizzando software agli elementi finiti e di analisi dei sistemi ad alta frequenza;
3. Simulazione del modello a parametri concentrati, per il calcolo del coefficiente di accoppiamento, come visto in precedenza;
4. Studio sperimentale di un prototipo, analizzando i principali parametri elettromagnetici e di risonanza del sistema;
5. Messa a punto dell'elettronica di potenza che coinvolge diversi metodi di studio dei circuiti.

In particolare la teoria dei quadrupoli a due porte può essere di maggior supporto nello studio.

Si definiscono dal circuito le matrici di impedenza, trasmissione e dispersione caratteristiche come:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}.$$

Riarrangiando le equazioni si può poi ottenere una relazione tra le diverse matrici, ricavando poi le formule per le potenze in gioco e i rendimenti associati. ogni matrice

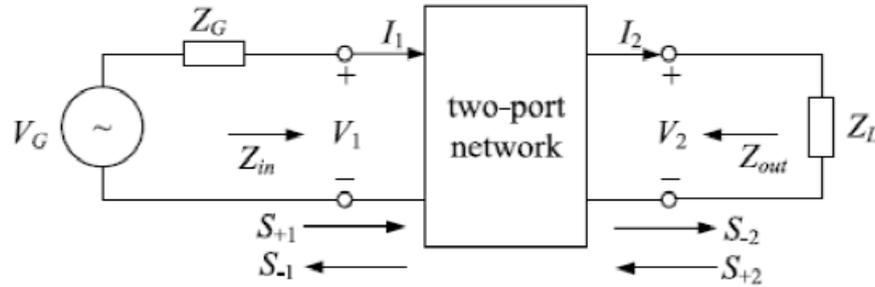


Figura 1.11: Quadrupolo.

deve essere particolarizzata con il tipo di compensazione utilizzata, al fine di ricavare i valori dei parametri in funzione delle capacità e delle induttanze del circuito reale e studiare più facilmente il comportamento del sistema.

1.5.2 Sicurezza del sistema

La trasmissione di potenza wireless dal punto di vista della sicurezza rappresenta un passo in avanti rispetto ai tradizionali metodi di trasmissione, in quanto esclude il pericolo di folgorazione in caso di contatto. Tuttavia, presenta il sostanziale problema delle emissioni elettromagnetiche poiché produce un campo elettromagnetico ad alta frequenza fra le due bobine accoppiate. Questo campo, che è a fondamento dell'intero sistema non può essere schermato e, a causa della distanza presente, non viene perfettamente concatenato causando un alto campo disperso. Quindi, deve essere verificato per ogni singolo sistema se il campo non accoppiato soddisfi o meno i regolamenti in materia di sicurezza dei vari Paesi. Bisogna definire una zona di sicurezza per ogni veicolo durante l'alimentazione dello stesso, che comprenda le posizioni normalmente assunte, ad esempio in piedi accanto all'autovettura o seduti all'interno. Fortunatamente il telaio e altre parti della vettura sono fatte di acciaio, che aiuta in modo decisivo a schermare l'interno della vettura e le immediate vicinanze.

La commissione internazionale per la protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ICNIRP) è l'istituto più avanzato in questo ambito ed ha diramato due diversi standard a cui far riferimento. Nel primo, emesso nel 1998, viene fatta una distinzione a seconda che l'esposizione sia professionale o pubblica. Per quest'ultima il limite per campi a frequenza compresa tra $0,8 \div 150$ kHz è di $6,25 \mu\text{T}$, mentre nel secondo caso c'è una differenziazione. Per frequenze fino a 65 kHz, il limite è $30,7 \mu\text{T}$, oltre è $2/f$ espressa in MHz. Per un sistema a 5 kW l'induzione media a cui è esposto un corpo alto 1,5 m è risultata essere $4,4 \mu\text{T}$, mentre per la rotaia sopra citata da 35 kW, ad un metro dal centro della carreggiata si misura $2,8 \mu\text{T}$. Quindi sia per la carica stazionaria che per quella dinamica è ampiamente possibile rispettare i limiti imposti dal ICNIRP. Nel 2010, a seguito delle esperienze mediche acquisite in questo campo, si è deciso di innalzare i limiti di esposizione fino a 27 e $100 \mu\text{T}$, rispettivamente nei due casi, non

costituendo un pericolo per la salute e in quanto la precedente norma risultava essere troppo conservativa. La normativa emessa dalla IEEE, invece, permette livelli molto superiori: fino a 205 e 615 μT per il torso e la testa e addirittura 1130 μT per gli arti.

1.5.3 Vehicle to Grid

Un altro interessante aspetto del WPT è la sua possibile bidirezionalità, la trasmissione sia dalla rete alla vettura che viceversa, aprendo scenari di maggior efficienza per il sistema elettrico. Infatti, la fruibilità di questo sistema si integrerebbe perfettamente nelle *smart grid*, in quanto si potrebbero appianare i picchi e i buchi di potenza richiesta lungo la giornata, livellando di fatto il carico e rendendo più efficiente la produzione. Inoltre, i pacchi di batterie potrebbero servire come *energy bank* rendendo così maggiormente sfruttabile l'energia proveniente dalle fonti rinnovabili che non sono programmabili. Per far ciò, il raddrizzatore a diodi al secondario deve essere rimpiazzato con un convertitore controllato. Tuttavia si è ancora agli inizi per questa nuova concezione sia della rete che dei sistemi di accumulo e tanto deve essere ancora ottimizzato per una sua effettiva integrazione.

1.5.4 Comunicazione wireless

Un passo avanti in questo senso è rappresentato dal sistema di comunicazione di cui dovrebbero essere dotati tutti i veicoli, per poter dare un feedback ai sistemi di controllo. Più in particolare, si necessita di sapere lo stato di carica del pacco batterie per poter regolare il flusso di potenza dalla rete al veicolo. Ci son due principali metodi per trasmettere il segnale: se è modulato con la trasmissione della potenza o se è a frequenze completamente diverse. Il primo è utilizzato nei trasferimenti a bassa potenza e, di riflesso, frequenza. Ad esempio, utilizzando 2 kHz per trasferire potenza, è facile anche processare il segnale associato attraverso i microcontrollori presenti nel dispositivo: così facendo, è possibile risparmiare le antenne e i chip di controllo per un sistema di comunicazione dedicato. Nei sistemi per veicoli elettrici, a causa delle alte tensioni nelle bobine, è necessario isolare il circuito di comunicazione, aumentando i costi. Possono essere utilizzati sistemi Bluetooth, NFC e smili, mentre per realizzare connessioni più complesse, come nel caso del *vehicle to grid*, si utilizza il protocollo Wi-Fi 802.11p, oltre al sistema GPS, per connettere tra loro i veicoli e la rete.

Capitolo 2

Soluzioni commerciali

È ormai passato un decennio dal quando sono stati pensati e presentati i primi prototipi basati su questa tecnologia e grandi passi avanti sono già stati fatti nello sviluppo. Si è progrediti riuscendo a trasferire poche decine di Watt a decine di kW in brevissimo tempo, rendendo la WPT appetibile ad un grandissimo campo di applicazioni, dal campo medico a quello dei trasporti, passando per l'illuminazione e la trasmissione dell'energia elettrica. In particolare nel settore dei trasporti, diverse aziende hanno già esplorato questa tecnologia e hanno deciso di puntare fortemente su di essa, indicandola come il futuro della mobilità ecosostenibile per tutti gli aspetti già visti in precedenza. Alcune di queste, sono giunte ad implementare dei prototipi funzionanti di diverse tipologie (bus, auto e tram) in ambiente urbano, mostrando la piena capacità operativa e gli innumerevoli vantaggi che la trasmissione di potenza wireless porta in dote: silenziosità dei veicoli, emissioni zero degli stessi e assenza di elementi visibili.

I principali fautori di questo progresso sono Bombardier, Qualcomm e Wampfler, per quanto riguarda le aziende, e il KAIST, per citare un'università fortemente impegnata in questo campo, oltre a diversi consorzi, tra cui non si può non nominare FABRIC. Molti sistemi sono già attivi e presenti sul territorio europeo, oltre che in Italia, ad esempio a Genova e Torino, dove sono stati adottati autobus elettrici ricaricati attraverso la WPT anche se senza la risonanza del sistema, a testimonianza di quanto forte sia la spinta su questa tecnologia. Si procederà ora con l'analisi delle migliori soluzioni ideate da questi istituti, grazie ai dati disponibili nelle pubblicazioni.

2.1 Conductix-Wampfler

La tecnologia IPT (trasferimento induttivo di potenza) apre molte possibilità ai progetti che richiedono dei sistemi di elettrificazione mobile. Il sistema IPT sviluppato da questa azienda è il primo sistema di trasferimento di potenza senza contatto su vasta scala, il quale ha rivoluzionato il modo in cui tutti i tipi di macchine mobili possono essere alimentati con energia elettrica. Basandosi sul noto principio dell'induzione elettromagnetica e sviluppandolo ulteriormente per soddisfare le esigenze dell'industria moderna, Conductix-Wampfler ha segnato una conquista tecnologica nel campo dell'elettrificazione. In particolare, facendo riferimento ad un trasformatore tradizionale, al

primario la bobina è stata sostituita con un paio di cavi lungo il percorso che il veicolo dovrà fare. Il secondario è libero di muoversi con sufficiente libertà rispetto alla sorgente e, soprattutto, a qualsiasi velocità. La frequenza scelta per trasferire la potenza è di 20 kHz, senza tuttavia applicare il concetto di risonanza visto in precedenza. Per riuscire a trasferire anche le informazioni di controllo, questa azienda ha sviluppato un sistema, denominato "iDat2", che assicura al segnale la dovuta separazione e non interferenza con altri sistemi basati su radiofrequenze. Questo aspetto risulta determinante per lo scambio di dati tra il veicolo in movimento e il sistema sorgente. Nel dettaglio, per quanto riguarda la posizione, un sistema di segnalamento di quest'ultima sul pavimento è attivato dal campo magnetico creato dal primario e trasmette continuamente dati sul veicolo, senza necessità di elettronica di attivazione sullo stesso. Sono state studiate tre diverse configurazioni: la prima "Rail", consiste in una rotaia posta lateralmente all'applicazione, la seconda "Floor" che viene implementata nel suolo e la terza "Charge", per livelli superiori di potenza.

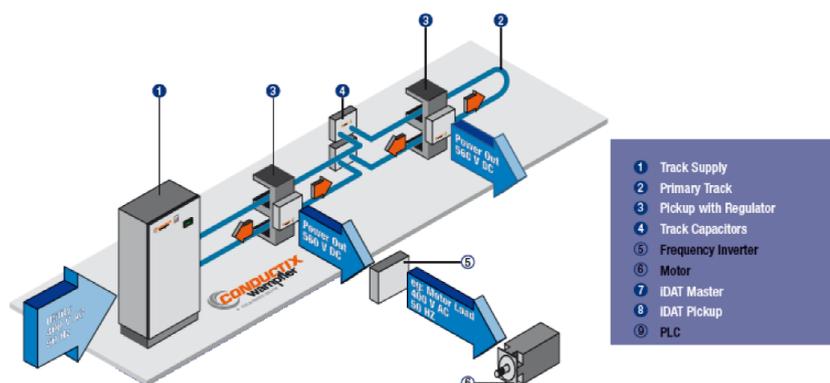


Figura 2.1: Sistema IPT-Rail.

IPT-Rail, destinata principalmente all'uso in ambito industriale lungo le catene di produzione, è composta, al primario, dalla linea di alimentazione e da banchi di condensatori per compensare l'alta induttanza presente nel sistema. Al secondario invece, sono presenti un nucleo ferromagnetico ad E con annessa bobina ricevitrice e regolatore, che fornisce 560 V in continua a cui si può collegare il carico desiderato, posti sul veicolo da alimentare. In generale, per queste applicazioni, non è necessaria una segmentazione della linea, anzi è desiderabile che sia una linea continua e completamente energizzata, da cui il bisogno di assicurare la tensione corretta di alimentazione mediante il rifasamento del circuito. Le potenze trasferibili dipendono dal modulo installato che può essere da 750 W o da 4 kW.

Per movimentare veicoli che debbano muoversi con maggior libertà, ad esempio muletti o AGV, si è sviluppata la tecnologia IPT-Floor. Al primario rimane sostanzialmente uguale a quella su rotaia, a parte la segmentazione che può essere effettuata in questo caso e che, quindi, richiede l'implementazione del sistema iDat per poter alimentare solo i segmenti di cui si necessita e guidare lungo il percorso il veicolo. Al secondario invece, sono presenti alcune differenze a partire dalla forma ad F del nucleo

ferromagnetico e dalle potenze disponibili, 750 W o 2,5 kW. Con questo metodo si può eliminare completamente la parte di storage nel veicolo solo se si è in grado di elettrificare totalmente la parte interessata. Queste due soluzioni sono limitate all'utilizzo in ambito industriale, all'interno di capannoni o aree adibite alla movimentazione delle merci.

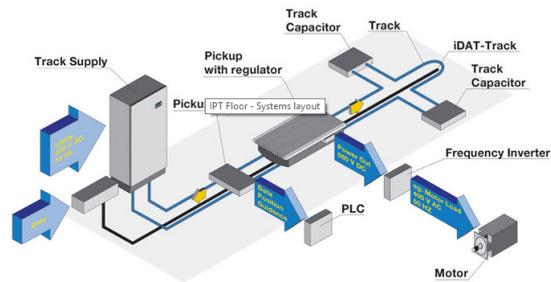


Figura 2.2: Sistema IPT-Floor.

Per far evolvere il sistema a potenze maggiori, come quelle richieste dal settore dei trasporti, si è studiato un ulteriore prodotto chiamato IPT-Charge. Presente dal 2003, con questo apparato si alimentano tutt'ora 20 autobus a Torino, in totale controllo e sicurezza. Questo sistema è molto simile concettualmente alla tipologia Floor, il carico è rappresentato dal pacco batterie che alimenta a sua volta il motore e i servizi ausiliari. Le potenze in gioco possono raggiungere i 60 kW, quindi gli apparati di trasmissione devono essere opportunamente dimensionati. L'unica sostanziale differenza è rappresentata dal circuito di controllo, molto più complesso poiché necessita di sovrintendere a diversi parametri al fine di calcolare la potenza richiesta dal veicolo, come lo stato di carica delle batterie, la temperatura, la tensione, ecc. Nel settore dei trasporti inoltre, non è utilizzata per la carica dinamica, ma solo per quella statica durante le fermate degli autobus in modo da garantire ugualmente un servizio continuo a fronte della diminuzione della capacità delle batterie.

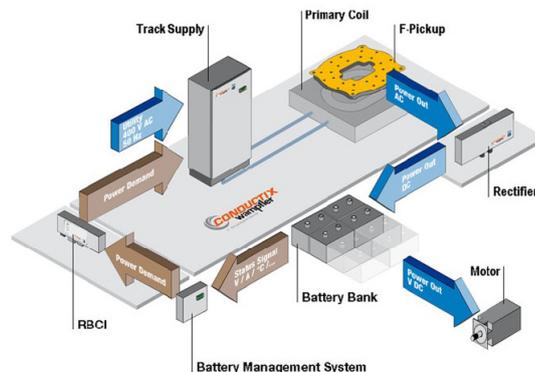


Figura 2.3: Sistema IPT-Charge.

2.2 Bombardier e-primove

Bombardier, dimostrando l'impegno profuso in questo campo, ha creato un'intera divisione, denominata *e-primove*, con lo scopo di sviluppare e rendere commercializzabile la tecnologia. L'obiettivo principale è quello di creare un sistema completo che permetta di essere integrato facilmente all'interno delle aree urbane e nel settore dei trasporti per migliorare i costi di gestione e la qualità della vita. Infatti, questo sistema abbatte le emissioni locali di CO_2 , limita l'inquinamento acustico e si adatta perfettamente all'ambiente, essendo invisibile e non necessitando di cavi, fili e prese.

2.2.1 PRIMOVE package

Il *PRIMOVE Package* è stato sviluppato prima per i tram, in modo da eliminare le sgradevoli catenarie e i pericoli ad esse associate, per poi diventare fruibile sia dai bus che dai mezzi privati e commerciali. Questo pacchetto offre ai costruttori di veicoli e agli operatori una quantità importante di soluzioni e flessibilità, sia per i mezzi su rotaia che su strada, poiché include il sistema di trasmissione, le batterie e la parte di propulsione e controllo. I sistemi di ricarica prevedono potenze trasferibili per singolo sistema accoppiato fino a 200 kW, per tram e bus, 22 kW per i veicoli commerciali e 3,6 o 7,2 kW per le autovetture.

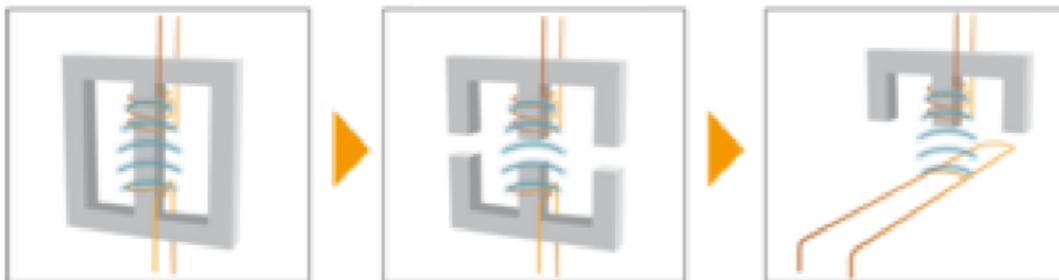


Figura 2.4: Sistema di trasmissione.

Come si può notare in figura 2.4, il principio su cui si basa questa soluzione è quello della semplice induzione elettrica con la presenza di nuclei magnetici, ponendo al primario una serie di cavi per la generazione del campo elettromagnetico. In particolare, si utilizza una variante dello schema ad "I", già visto in precedenza, solo con un intreccio di tre cavi, anziché due, e senza il supporto di un nucleo ferromagnetico. Questo sistema risulta molto efficiente per la carica stazionaria e a basse velocità.

A questo sistema di trasmissione viene accoppiato un sistema di batterie, basate sugli ioni di litio, di nuovissima concezione che le rendono le più efficienti e leggere attualmente sul mercato e in grado di durare dai 6 agli 8 anni, grazie alla gestione intelligente delle stesse. Questo traguardo è stato ottenuto grazie al monitoraggio continuo delle principali grandezze quali tensione, corrente e temperatura, che assicura grande affidabilità e sicurezza. Sono disponibili diversi formati da 50, 60 e 90 kWh, il primo dedicato ai tram e i secondi, in gruppi modulari da 30 kWh per 360 kg ciascuno, per autobus.

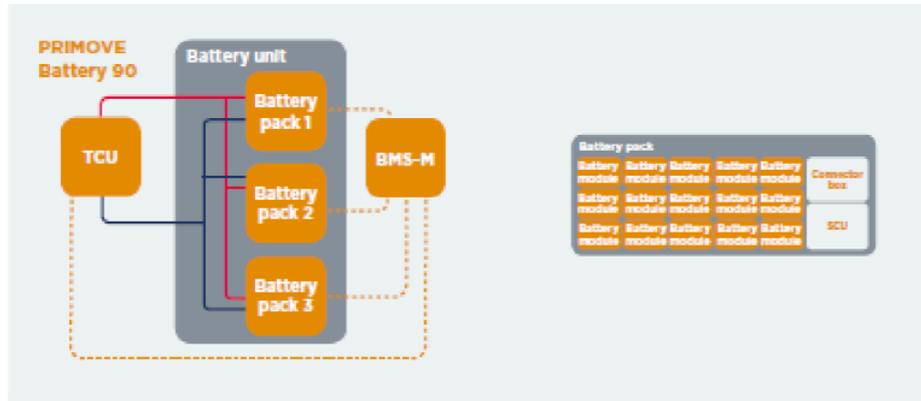


Figura 2.5: (a) Pacco batterie (b) Modulo da 30 kWh.

Queste sono in grado di lavorare ad una tensione nominale di 660 V e sono controllate dal *battery management system master* (BMS-M) e dalla *thermal conditioning unit* (TCU). La ricarica avviene attraverso il sistema WPT a 200 kW e quindi si riesce a completare con una sosta di maggior durata al capolinea, oltre che nelle brevi soste in alcune fermate intermedie.

Un supporto alle batterie è costituito dal *MITRAC Energy Saver*, sviluppato sulla tecnologia dei supercondensatori, che permette di immagazzinare energia ad alta potenza, come può essere in frenata, e rilasciarne altrettanta in accelerazione, in modo da livellare il carico. Così facendo, si riesce a ridurre l'energia complessiva di un sistema, come un tram o un bus, fino al 30%. I supercondensatori sono connessi tra loro in serie al fine di creare un'unità di accumulo. La tecnologia è sufficientemente matura da garantire una durata fino a 10 volte superiore alle batterie senza necessità di particolari manutenzioni, con pesi e ingombri ampiamente paragonabili a queste ultime.

Per concludere l'intero apparato di propulsione è stato necessario progettare il controllo dello stesso, denominato *MITRAC*. Consiste in un design modulare e scalabile a seconda delle esigenze di applicazione e potenza impiegata, basato sull'unità CM-S formata da 12 convertitori IGBT e raffreddata a convezione forzata d'aria. Questo sistema è connesso a tutte le parti atte alla propulsione elettrica, per garantire tra loro un'ottima integrazione e interoperabilità. Nel sistema per autobus, utilizzando questa interazione, si trasformano le potenze provenienti dalle batterie e dal sistema di trasmissione wireless in una potenza in corrente alternata per i motori di trazione e, in parte, per i servizi ausiliari a 24 V in continua o a 400 V AC. Il sistema è inoltre bidirezionale in quanto è in grado di ricaricare il sistema di storage nel momento in cui i motori sono utilizzati per frenare il veicolo in discesa o durante una frenata. Questa tecnologia, di comprovata solidità e affidabilità, è affiancata da un sistema diagnostico collegato in remoto tramite Wi-Fi o segnali radio, che permette di pianificare e ridurre al minimo la manutenzione necessaria.

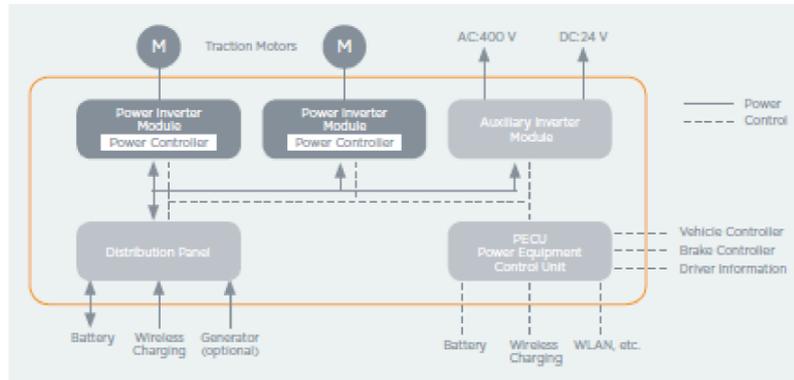


Figura 2.6: Schema MITRAC.

2.2.2 Applicazioni in studio

Bombardier ha già lanciato la costruzione di qualche progetto pilota, sia per quanto riguarda i tram, i bus di linea e i veicoli commerciali, mentre si sta ancora studiando il sistema di carica dinamica per automobili in uno scenario di traffico. Nell'implementazione urbana per tram, la composizione del sistema è così formata: una prima parte, formata da 9 segmenti di 5 m l'uno, è interrata al di sotto delle fermate predisposte, dopodiché un tratto fino a 140 m è utilizzato per fornire il supporto di potenza durante l'accelerazione del veicolo. In questo secondo tratto sono richiesti segmenti più lunghi, quindi con minor efficienza, per velocità superiori a 15 km/h. Quindi segue la fase di coasting e di frenata, di circa 700 m, dove non è necessario nessun primario per fornire energia poiché si fa affidamento sul pacco batterie, per fermarsi nuovamente in una stazione di carica. La potenza trasmessa necessaria è di 400 kW, fornita attraverso la composizione di due moduli da 200 kW.

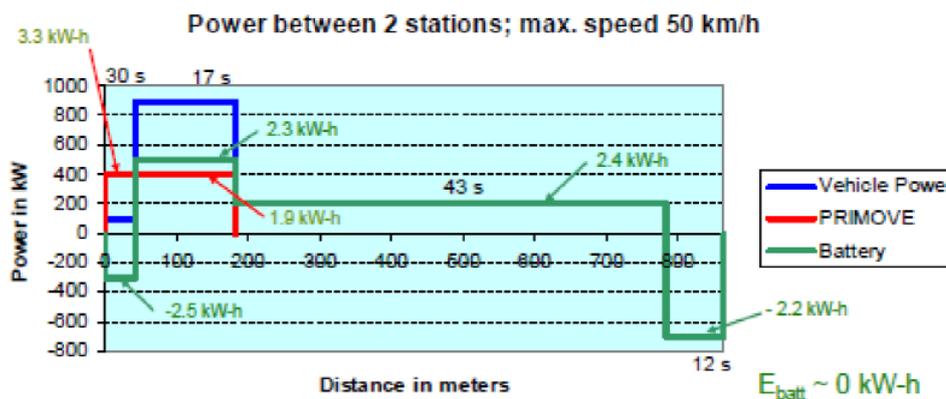


Figura 2.7: Andamento delle potenze in gioco.

Si può facilmente verificare dall'andamento dei grafici che, in questo modo, si riesce a non sovraccaricare eccessivamente le batterie e rendere minore la capacità di storage delle stesse di circa un terzo, diminuendo così costi e ingombri. Inoltre, in un ciclo

di utilizzo si consuma completamente la carica immessa nel sistema, evitando così pericolosi accumuli e garantendo la maggior durata dello stesso.

Per quanto riguarda i bus invece, si adotta sostanzialmente lo stesso schema con specifiche diverse, senza tuttavia la parte che supplisce all'accelerazione, probabilmente a causa della difficoltà di integrazione nella normale rete viaria. La potenza erogata scende a 200 kW, non tutte le fermate devono essere dotate della piazzola di carica e viene aggiunto un sistema di riconoscimento del veicolo più sofisticato (Vehicle Detection and Segment Control) per controllare l'accensione e lo spegnimento dell'apparato. Ad esempio, nelle città di Mannheim, in Germania, la linea 63 è formata da 23 fermate lungo 9 km di tragitto, percorso alla velocità commerciale di 13,4 km/h. Per aumentare considerevolmente l'efficienza delle continue frenate ed accelerazioni imposte sia dal traffico sia dalle fermate necessarie all'esercizio, l'elettrificazione della linea è caldamente raccomandata.

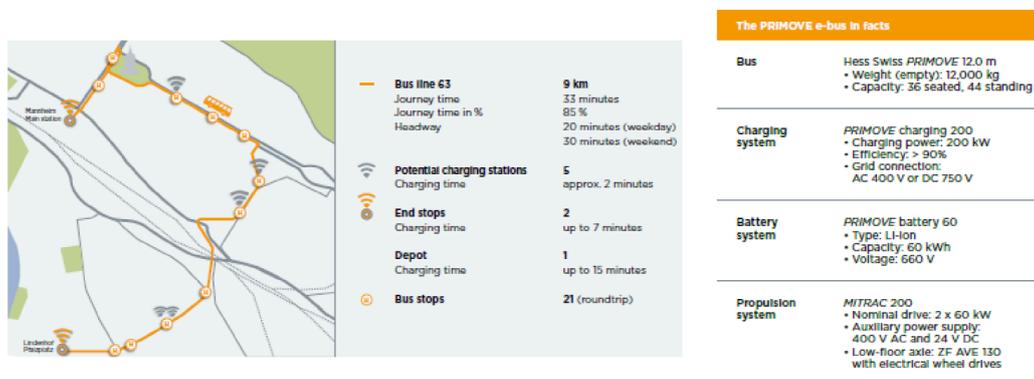


Figura 2.8: Specifiche della linea 63.

Si può chiaramente notare che il numero di fermate da utilizzare per la ricarica è limitato a sole 5, con un dispendio di tempo aggiuntivo minimo, oltre a quelle di inizio e fine corsa che son ovviamente più lunghe. Questo, inoltre, è il primo sistema che utilizza tutti i prodotti del brand *Primove*, che include anche un sistema di interfaccia migliorato tra i due lati della trasmissione poiché implementa anche un carrello estensibile per rendere minima la distanza tra l'apparato ricevitore e quello sorgente. Ciò diminuisce drasticamente il flusso disperso e, di conseguenza, riduce l'esigenza di schermare l'interno e le vicinanze dell'autobus aumentando notevolmente il rendimento, superiore al 90%. È importante sottolineare che la stessa tipologia è stata adottata a Bruges, in Belgio, che è patrimonio mondiale dell'UNESCO, dove perciò non era consentito l'utilizzo di catenarie, per non rovinare la bellezza dell'ambiente urbano.

Un sistema complementare per il trasporto urbano è costituito dall'utilizzo di veicoli commerciali. Nel primo caso studio, sono stati affiancati ai bus dei Mercedes Vito e-Van anche come mezzi di servizio, la loro autonomia è di 240 km e grazie alla carica a 22 kW presente nel deposito sono facilmente ricaricabili in appena 3 ore, decisamente minore se paragonata alla normale carica domestica a 3,3 kW.

Per quanto riguarda le automobili invece, il sistema in sviluppo prevede solamente la carica statica, con limitate prestazioni in caso di disallineamento. La potenza erogata

varia da 3,6 a 7,2 kW e non sono presenti ancora integrazioni con altri sistemi di storage o controllo prodotti dalla stessa azienda.



Figura 2.9: Funzionamento Z-Mover.

Un ulteriore elemento di raffinazione è dato dall'elevatore lungo l'asse z, denominato "Z-Mover", che permette la ricarica anche per i veicoli con la maggior altezza da terra come i SUV. Inoltre, è possibile rendere completamente automatico l'intero apparato di ricarica, traguardo raggiungibile grazie ai sistemi di *park-assistant* che possono rilevare e posizionare il veicolo nel modo corretto, al fine di ottimizzare e semplificare al massimo l'operazione.

2.3 KAIST

Una delle università più all'avanguardia nello sviluppo di questa tecnologia è senza dubbio il Korea Advanced Institute of Science and Technology, che finora ha progettato e costruito tre diverse generazioni della trasmissione di potenza wireless: la prima dedicata ad un golf kart, la seconda ad un autobus e la terza ad un SUV. È già stata costruita una linea nel 2010, per un trenino completamente elettrico, di 2,2 km che non necessita di alcuna ricarica delle batterie per poter funzionare, essendo alimentato direttamente dalla linea stessa per il 16% della distanza totale, garantendo standard di sicurezza molto superiori ai limiti imposti nel 1998 da ICNIRP. La prima generazione era basata sul concetto di trasmissione di potenza senza la risonanza del sistema, quindi con l'ingombrante presenza di nuclei ferromagnetici essenziali per ottenere un buon accoppiamento del sistema. La trasmissione è garantita grazie a due nuclei ad E affiancati l'uno sull'altro e distanziati di 1 cm. Al primario due cavi erano distesi lungo le cavità presenti, uno per l'andata e l'altro per il ritorno della corrente, alimentata a 100 A e 20 kHz per fornire 3 kW di potenza. Mentre al secondario è presente una bobina ricevitrice avvolta sul dente centrale del nucleo magnetico. Tuttavia, questo sistema è molto sensibile ai disallineamenti laterali e quindi è presente un controllo meccanico per garantire uno scostamento massimo di 3 mm, non particolarmente adatto ad uno scenario di traffico. In queste condizioni il rendimento ottenuto è pari all'80%.

La seconda generazione invece, cerca di supplire alla mancanza di libertà di movimento e al traferro massimo necessario per ricavare delle efficienze accettabili. Per garantire il funzionamento ad almeno 12 cm di distanza tra gli apparati, si è ricorso ad una forma ad U del nucleo primario e ad un solenoide planare al secondario.

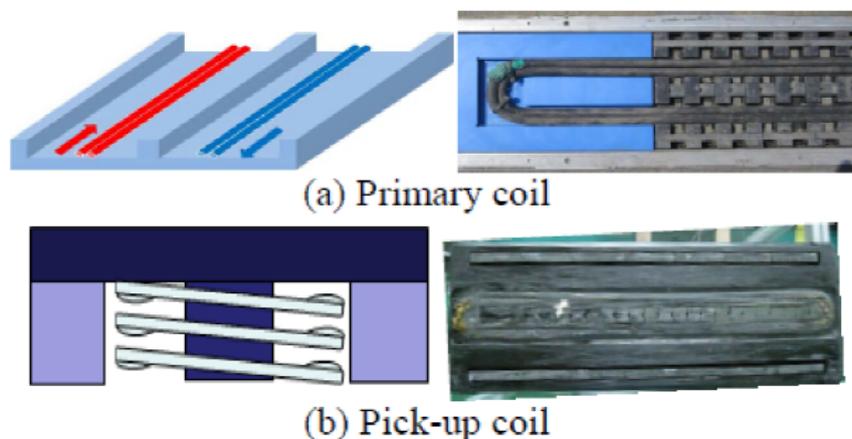


Figura 2.10: Prima generazione.

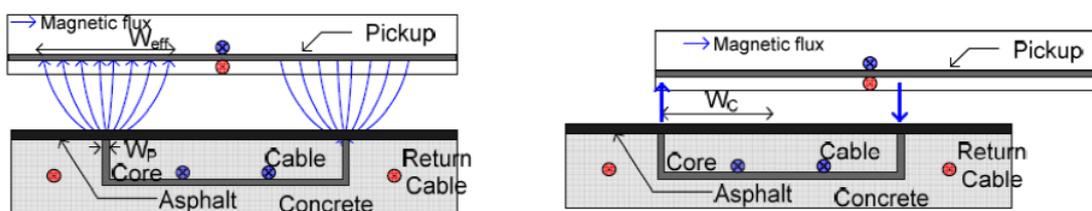


Figura 2.11: Seconda generazione.

Come si nota in figura 2.11, la differenza è insita nel diverso percorso fatto dal flusso magnetico che, grazie al posizionamento parallelo al terreno del secondario, subisce un effetto di dispersione in uscita dal primario. Così facendo, con un secondario di ampiezza superiore, si riesce a concatenare il maggior flusso possibile, anche su distanze notevolmente maggiori, grazie alla dipendenza del flusso con la radice della distanza. L'effetto maggiore, si evidenzia però durante il disallineamento del sistema, infatti, il massimo tollerabile passa da pochi millimetri a circa metà della lunghezza del primario, quindi non è più necessario il controllo meccanico della prima generazione. La frequenza di alimentazione resta la stessa, ma viene raddoppiata la corrente in modo da trasferire 6 kW per sistema. Per fornire i 60 kW necessari all'autobus si pongono 10 apparati connessi tra loro e si raggiunge una potenza disponibile all'uscita di 52 kW, che corrisponde ad un rendimento totale del 72% ad una distanza di 17 cm. È stata costruita nel 2013 una linea nella città di Gumi basata su questa generazione, con aumento della potenza trasmessa a 100 kW e un rendimento massimo dell'85%, sulla quale circolano 12 autobus completamente elettrici con solo il 20% di capacità delle batterie rispetto ad un sistema tradizionale, il tutto nel rispetto delle norme IC-NIRP. Uno degli importanti limiti presenti è dovuto alla necessità di allungare ad 1,4 m la lunghezza del primario, per abbattere, grazie al cavo di ritorno della corrente così lungo, i problemi legati e le emissioni elettromagnetiche stesse. Oltre che all'utilizzo di un solenoide planare che, producendo dei flussi dispersi al di sopra di esso, rende

necessaria una schermatura più pesante e abbassa di conseguenza il rendimento del sistema.

La terza generazione, per risolvere questi problemi si è affidata ad un'ulteriore evoluzione del nucleo magnetico. Passando ad una configurazione a doppia U o W, la struttura non necessita infatti di un cavo di ritorno. Avendo dei nuclei magnetici stretti al primario rispetto a quelli più generosi del secondario e un percorso di ritorno doppio, interessato quindi da metà del flusso, si riesce ad aumentare la potenza trasferibile con, tuttavia, un disallineamento laterale consentito di circa un quarto dell'ampiezza del primario. Al secondario, inoltre, viene adottata la tipologia *single sided*, al fine di concentrare i flussi tra le due bobine e rendere così meno impegnativa la schermatura.

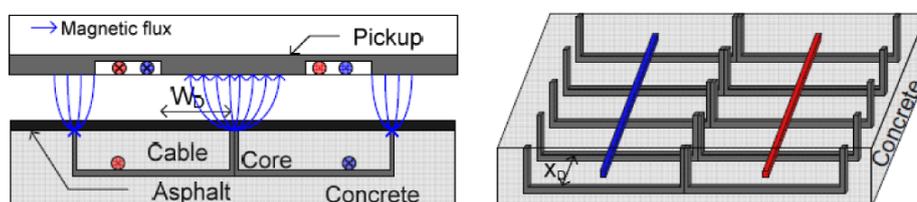


Figura 2.12: Terza generazione.

Però con questa configurazione a spina di pesce del nucleo, si riesce a risparmiare l'80% del materiale ferromagnetico se comparato con la seconda generazione oltre ad aumentarne la solidità in accoppiata con l'asfalto, con un aumento di potenza a 17 kW per apparato. Inoltre, il flusso, non dipendendo fortemente dall'ampiezza delle spine di pesce, con un passo di 7-10 cm diminuisce infatti del 15%. Nel SUV testato, il sistema raggiunge un'efficienza del 71%, con un pacco batterie ai polimeri di litio di 13 kWh, sempre ad una distanza di 17 cm dal suolo.

2.4 Qualcomm Halo IPT

Nel 2011, la Qualcomm ha acquisito l'azienda HaloIPT, uno spin-off dell'Università di Auckland, che ha sviluppato questa tecnologia a partire dagli anni '90 per la ricarica di veicoli elettrici. Per questo motivo, la letteratura disponibile è molto più ampia e tecnica ed è possibile effettuare un'analisi molto più approfondita dei sistemi sviluppati.

La frequenza di risonanza scelta dagli sviluppatori è di 85 kHz, per ogni sistema studiato, poiché rappresenta il giusto compromesso tra l'ottimo tecnico, le interferenze elettromagnetiche e l'interazione con altre applicazioni a radiofrequenze. L'elemento che caratterizza principalmente il sistema è la sua dimensione, poiché deve riuscire a essere integrato su una grande varietà di veicoli. Normalmente l'altezza da terra può variare dagli 8 ai 12 cm e i pad son sviluppati per non far variare significativamente il coefficiente di accoppiamento con delle tolleranze laterali di 15 cm per parte. Per ottenere questo risultato è necessario aumentare le dimensioni degli apparati coinvolti nella trasmissione. Le dimensioni ottenute variano a seconda della potenza in gioco: per 3,3 kW il pad misura 350x400x25 mm per 5,5 kg, mentre per 22 kW si raddoppiano

in pratica raggiungendo 650x400x25 mm e un peso di 19 kg, comunque ampiamente sostenibile da un automezzo.

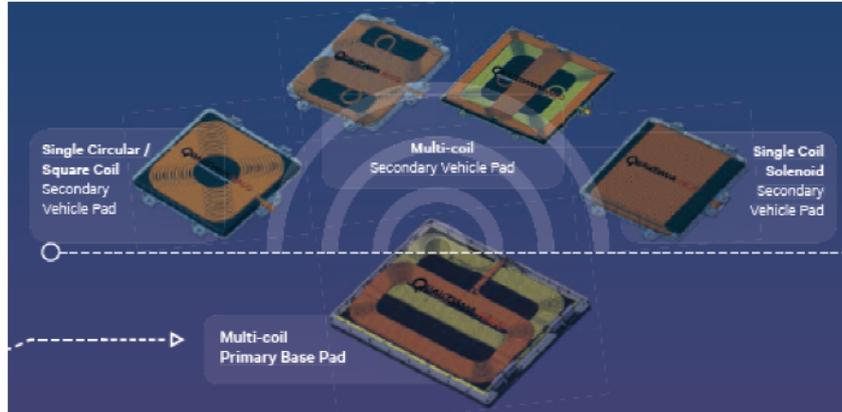


Figura 2.13: Sistema Qualcomm HaloIPT.

2.4.1 Applicazioni stradali

I ricercatori hanno sviluppato un sistema adatto sia alla carica stazionaria che a quella dinamica che si basa sui pad polarizzati (DD e DDQ sovrapposti), poiché ha migliori tolleranze in presenza di disallineamento rispetto a quelli circolari. In particolare, non è presente il punto di annullamento oltre la metà del diametro e prima dell'accoppiamento con il successivo apparato. Con questo metodo non è possibile garantire un profilo di potenza trasmessa continuo, nemmeno conducendo il veicolo senza disallineamenti. Una soluzione poco economica è quella di distribuire più file di pad con un piccolo scarto, sono necessari però almeno il doppio degli apparecchi. Le tipologie DD e *multicoil*, quando sono distribuite in successione, garantiscono un profilo continuo della potenza lungo l'asse di marcia del veicolo e soddisfano perciò i requisiti per entrambi i tipi di ricarica. Inoltre, se si suppone che le potenze necessarie per ogni tipo di veicolo oscillino tra i 20 e i 60 kW, le dimensioni del sistema per trasferire queste potenze aumentano inevitabilmente, diminuendo perciò il numero dei pezzi necessari per km, abbattendo così i costi.

Rappresentano, quindi, la modalità individuata per trasferire potenza nel caso dinamico, garantendo un'efficienza totale del sistema dalla rete alle batterie superiore al 90%. Il sistema è adatto ad essere posizionato in diversi luoghi rispetto all'asfalto, interrato, livellato o posto sopra ad esso senza modificare le condizioni di operatività. Questo tipo di implementazione garantisce inoltre un'ottima interoperabilità con altri sistemi di ricezione, l'unico vincolo è che devono essere sintonizzati sulla stessa frequenza di risonanza della sorgente. La commercializzazione del sistema statico è prevista per il 2016, poi si proseguirà con lo sviluppo di un sistema semidinamico per brevi tratti di frenata ed accelerazione posti in prossimità di un semaforo, ad esempio.

Capitolo 3

Dimensionamento di un sistema WPT

Dopo aver fornito una panoramica sullo stato dell'arte di questa tecnologia, si vuole procedere nel dimensionamento di un apparato sia dal punto di vista magnetico, attraverso la simulazione agli elementi finiti, sia dal punto di vista circuitale che impiantistico, al fine di poter dare un'visione completa su tutto il procedimento di progettazione elettrica del sistema.

Si prenderanno in esame due diverse tipologie di sistema, quello a bobine rettangolari e a doppia D, in modo da poter confrontare i risultati ottenuti e scegliere quella che più si addice alla carica dinamica di un veicolo elettrico. Si procederà quindi con il dimensionamento vero e proprio dell'apparato sorgente e ricevente, dal punto di vista elettromagnetico, grazie all'analisi delle induttanze e dell'accoppiamento garantito in funzione delle dimensioni caratteristiche del sistema (numero di avvolgimenti, dimensioni, configurazione delle ferriti, ecc) attraverso Flux 11.2 di Cedrat. Si valuterà quindi l'impatto della compensazione sul sistema, necessaria per raggiungere la condizione di risonanza, nelle due diverse configurazioni serie-serie e parallelo-parallelo nelle situazioni di disallineamento del sistema.

Dopo aver scelto la struttura finale dell'apparato, si analizzerà la simulazione della marcia del veicolo, in modo da stabilire la distanza tra due sorgenti al fine di massimizzare le prestazioni dell'intero sistema. Per concludere, si valuteranno i valori di campo magnetico nelle vicinanze dal punto di vista della sicurezza e delle normative vigenti in materia, per stabilire se è necessaria la presenza o meno di uno schermo elettromagnetico di alluminio.

3.1 Considerazioni preliminari

3.1.1 Veicolo destinatario

Innanzitutto è necessario scegliere un veicolo elettrico commerciale al quale associare questa tecnologia. Grandi case automobilistiche come Nissan, Renault e Mercedes sono già produttrici di furgoni a zero emissioni, con ottimi range di autonomia, ma ancora non sufficienti a soddisfare i km giornalieri che possono essere richiesti a questa tipologia di veicoli. L'applicazione della tecnologia di ricarica wireless permetterebbe

di aumentare sia l'autonomia, sia la capacità di carico, diminuendo la quantità di batterie necessaria per il suo funzionamento. Inoltre, l'ambiente urbano sarebbe il perfetto destinatario di questa vincente accoppiata, aumentando le efficienze dei motori e abbattendo le emissioni nocive nelle missioni di consegna porta a porta dei corrieri.

La scelta del veicolo elettrico è ricaduta sull'IVECO ECODaily, poiché rappresenta un mix di soluzioni tecnologiche molto avanzate, soprattutto dal punto di vista del pacco batterie, e un po' per orgoglio italiano. La propulsione è affidata ad un motore elettrico da 30 kW (40 kW di picco) di tipo asincrono trifase comandato da un inverter che ha il compito di muovere direttamente il veicolo e di recuperare energia durante la fase di frenata. ECODaily Electric è equipaggiato con batterie di trazione sigillate del tipo Zebra Z5 con tecnologia Na/NiCl₂ (Sodio Nichel Cloro), che non producono emissioni gassose, non richiedono manutenzione e sono totalmente riciclabili, con tensione nominale di 278 Volt. La loro capacità è di 76 Ah e sono in grado di fornire in uscita una corrente massima di 224 A. Quello che in passato era il vero limite dei veicoli elettrici, cioè il peso delle batterie che penalizzava il carico utile, è stato sostanzialmente superato da Iveco, con la realizzazione di un veicolo che, con le sue 2 batterie, ha un peso a vuoto di soli 300 kg superiore alla versione Diesel. Tutti i sistemi finalizzati alla trazione elettrica sono comandati da una centralina dedicata che comunica con essi per mezzo di una rete. I sistemi ausiliari, come il raffreddamento delle batterie e la pompa per l'assistenza alla frenata, sono alimentati dai motori elettrici a 12 V comandati dagli inverter DC/DC, mentre la pompa dell'idroguida è alimentata direttamente dalla batteria a trazione DC.

Sulla plancia è installato un display che fornisce all'autista le informazioni necessarie alla corretta conduzione del veicolo: stato di carica, tensione, temperature, corrente delle batterie di trazione ed indicazioni sulle condizioni di marcia del sistema di propulsione elettrica. ECODaily Electric si conduce in maniera del tutto simile a quella di un normale veicolo equipaggiato con cambio automatico, inserendo le marce per mezzo dell'apposita leva che comunica con l'inverter. La regolazione della velocità è garantita dall'inverter di trazione in base alla pressione sui pedali dell'acceleratore e del freno, relativamente alle differenti condizioni di marcia del veicolo.

L'unico vincolo che impone la scelta di questo furgone risiede nella massima larghezza che può avere l'apparato ricevitore, che deve essere minore della larghezza del veicolo stesso. Per questo modello, il massimo valore che può assumere, compreso lo schermo è di 1030 mm. Per quanto riguarda altezza e lunghezza invece non sono presenti vincoli strutturali anche se, chiaramente, minori sono gli ingombri migliore risulterà la capacità di carico in un'ottica di funzionalità e comfort. L'altezza da terra minima del telaio è di 155 mm, quindi si fissa la distanza tra la sorgente e il ricevitore a 200 mm per restare cautelativi.

3.1.2 Dati

La potenza richiesta dal motore è di 30 kW, quindi rappresenta quella che si vuole trasferire in modo da alimentare direttamente il veicolo. La parte eccedente la domanda del motore può essere dirottata per la ricarica delle batterie attraverso l'elettronica di potenza e la logica di controllo. Dalle esperienze più recenti in questo campo, si può



Figura 3.1: IVECO ECODaily Electric.

assumere un sovradimensionamento di circa il 40%, per far fronte alle potenze reattive comunque in gioco e alle perdite insite nel sistema, sia quelle per effetto Joule sia di flusso disperso. Quindi, la potenza di dimensionamento risultante in entrata è pari a $S_d = P_n * 1,4 = 43 \text{ kVA}$.

Come punto iniziale, per quanto riguarda i raddrizzatori che possono essere presi in considerazione, si può fare affidamento sul convertitore a ponte intero o a mezzo ponte a seconda se si vuole avere la possibilità di trasmettere in entrambe le direzioni oppure in una soltanto. In questa sede, visto le potenze in gioco, si farà riferimento ad un ponte intero trifase. Solitamente, in questo genere di applicazioni, è conveniente utilizzare dei generatori di corrente, in modo da non far variare la corrente al variare del carico. Sulla base delle esperienze accumulate, si fissa quindi la corrente circolante nelle bobine pari a 76 A efficaci. Da cui si ricava facilmente la tensione di alimentazione del sistema pari a 566 V. Questa tensione non è raggiungibile dal ponte trifase, tuttavia è comoda per poter fare dei confronti sulla tipologia di generatore utilizzato come si vedrà nel seguito.

Per stabilire la sezione di rame necessaria, si fissa una densità di corrente negli avvolgimenti pari a 4 A/mm^2 , in modo da poter preservare un buon margine di sicurezza e poter sovraccaricare il sistema (in caso di disallineamenti), la massima consentita è infatti solitamente 6 A/mm^2 . Si riesce quindi a ricavare una sezione di rame pari a 19 mm^2 , che, considerando un fattore di riempimento di 0,42, risulta essere in totale 45 mm^2 per un diametro di 7,6 mm.

La scelta della frequenza alla quale far operare è di fondamentale importanza, infatti da essa dipendono le entità delle grandezze in gioco e la capacità di concatenare un flusso sufficientemente potente da indurre la potenza desiderata al secondario. Dalle ricerche effettuate è emerso un *trend* crescente negli ultimi anni a partire dai 5 kHz fino ad arrivare ai 150 kHz, questo grazie alle nuove tecnologie scoperte nell'ambito degli inverter, il limite superiore è imposto anche dalle normative vigenti in alcuni paesi. La

scelta operata in questa sede è stata fatta con lo scopo di ottenere il massimo flusso concatenato possibile, riducendo al tempo stesso la necessità di utilizzare filo Litz con un numero elevato di conduttori. L'aspetto preponderante è rappresentato comunque dal carico che deve essere sostenuto dai convertitori, non lavorare alla massima frequenza disponibile permette di diminuire le perdite di commutazione in gioco e aumentare l'efficienza di tutto il sistema. La scelta quindi ricade su un valore intermedio in modo da trovare un buon compromesso tra tutti gli aspetti evidenziati pari a 85 kHz.

Ora è possibile creare il filo Litz definendo il numero e il diametro di ogni singolo conduttore: lo spessore di penetrazione del rame a questa frequenza è pari a $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = 0,226$ mm. Ciò conduce ad un diametro del singolo conduttore pari a 0,45 mm, per un'area di $0,159$ mm², per un totale di 120 conduttori all'interno della sezione.

Dal punto di vista circuitale è necessario stabilire una resistenza equivalente in modo da rappresentare il carico formato dal convertitore, le batterie e il motore. Fissate quindi potenza e corrente circolanti, è facilmente ricavabile tramite $R_L = P_n/I^2 = 5,194$ Ω.

Grandezza	Simbolo	Valore	Unità
Potenza nominale	P_n	30,0	kW
Potenza apparente	S_n	43,0	kVA
Frequenza	f	85,0	kHz
Tensione	V	566,0	V
Corrente	I	76,0	A
Resistenza carico	R_L	5,194	Ω
Densità di corrente	J	4,0	A/mm ²
Sezione conduttore	S_{Cu}	45,0	mm ²
Diametro conduttore	d	7,6	mm

3.1.3 Procedimento di analisi

Per determinare le grandezze caratteristiche del sistema in entrambe le configurazioni, si è deciso di operare con lo stesso metodo operativo che prevede diversi passaggi fino alle dimensioni finali. In primo luogo, basandosi sugli studi già effettuati, si è deciso di utilizzare la stessa geometria sia per il pad sorgente che per quello ricettore e dei concentratori di flusso da disporre al di sotto delle bobine. Entrambe le soluzioni sono state adottate al fine di massimizzare il flusso concatenato ed avere una prima riduzione del campo magnetico in prossimità di queste ultime. Il materiale utilizzato è ferrite N87, formata da manganese e zinco, con una permeabilità iniziale relativa μ_r di 2200 e una curva caratteristica di magnetizzazione come in figura.

I nuclei a disposizione misurano 93 mm di lunghezza e 16 di altezza, la larghezza invece prevede diversi step a partire da 28 mm, valore di partenza qui utilizzato. Facendo delle stime rispetto alle esperienze passate, si è determinata una prima configurazione delle ferriti attraverso il numero di nuclei che formano una striscia e di strisce stesse, configurando così le dimensioni interne della bobina. Per quanto riguarda quest'ultima, alcune semplificazioni per rendere più agevole la simulazione sono state compiute,

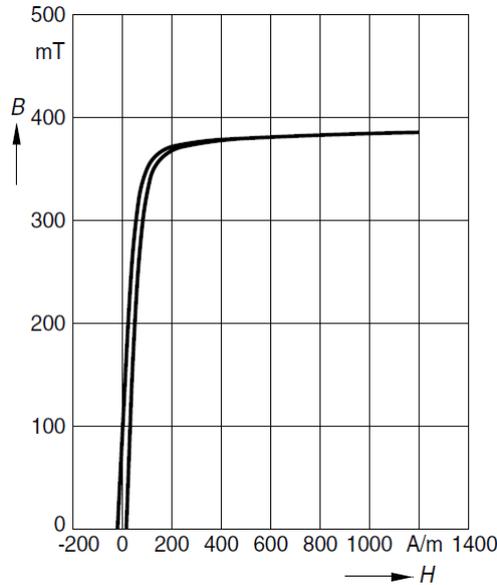


Figura 3.2: Curva di magnetizzazione della ferrite.

quali l'assenza di raggi di curvatura agli estremi, la modellazione della sezione del filo Litz come quadrata anziché circolare e il posizionamento di questi attigui senza spazi tra due adiacenti. Queste ipotesi, in ogni caso, non influenzano in modo determinante i risultati ottenuti, ma rendono notevolmente più rapide e veloci le simulazioni.

Una volta stabiliti i parametri geometrici principali della struttura si può procedere con lo studio degli effetti della variazione di altri aspetti. In particolare, sono stati presi in esame le seguenti grandezze: il numero di spire, la distanza tra le ferrite e la distanza tra i nuclei di ferrite e la bobina. La prima valutazione effettuata riguardava il numero di spire scelto in modo da garantire un buon accoppiamento tra le bobine: $k \simeq 0,3$, tenendo conto dell'incremento delle prestazioni rispetto al passo precedente. Una volta scelto il numero di spire, attraverso delle simulazioni si è determinato l'impatto delle diverse configurazioni degli spazi nell'accoppiamento del sistema. Studiando l'andamento, si è quindi stabilita la miglior accoppiata di valori in grado di fornire il miglior k in rapporto con le dimensioni del sistema.

Prestando particolare attenzione al procedimento effettuato con il calcolatore, per determinare il coefficiente di accoppiamento è stato necessario stimare le induttanze in gioco e la mutua presente tra i due avvolgimenti. Il risultato è stato ottenuto applicando un generatore di corrente da 1 A e facendo calcolare il flusso concatenato ad ogni bobina alimentandone una e sconnettendo l'altra. Per la mutua induttanza invece, si sono alimentate entrambe con il medesimo metodo e ricavata la stessa attraverso la formulazione:

$$\begin{cases} \Phi_1 = L_1 I_1 + M I_2 \\ \Phi_2 = M I_1 + L_2 I_2 \end{cases}$$

Con tutti i dati a disposizione si riesce infine a determinare il coefficiente di accoppiamento k , definito come $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$.

A questo punto, determinata la geometria del sistema, si vuole valutare l'impatto della tipologia e del grado di compensazione sullo stesso. Si sono verificate le compensazioni serie-serie e parallelo-parallelo, in quanto si sono dimostrate le più promettenti e permettono l'utilizzo dello stesso banco di condensatori sia al primario che al secondario, migliorando notevolmente la gestione dell'apparato. Per implementare la compensazione serie, si è fatto riferimento ad un circuito equivalente a T, dove L_a e L_b sono definite come $L_i - M$ e sono state compensate non completamente, in modo che con accidentali variazioni della frequenza o del carico non si cada in una sovracompensazione, in attesa della scelta dell'elettronica. Per la compensazione parallelo invece, si è adottato lo schema equivalente a Π , dove però non viene messa in evidenza la mutua nella sua totalità. Le induttanze equivalenti risultano $L_a = \Delta/L_2 - M$, $L_b = \Delta/L_1 - M$ e $L_M = \Delta/M$, con $\Delta = L_1L_2 - M^2$. Il pregio di questi circuiti equivalenti è quello di riflettere al primario la resistenza che rappresenta il carico R_L , senza importanti variazioni, in modo da ottenere i valori desiderati di tensione e corrente al secondario.

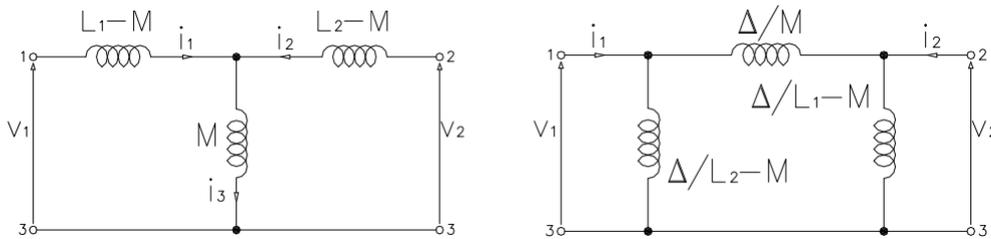


Figura 3.3: Circuiti a T e a Π .

Dopo aver scelto la tipologia di compensazione, si sono effettuate le prove lungo i due assi di traslazione possibili, y quello lungo il senso di marcia e x quello trasversale ad esso, sia con il generatore di corrente che con quello di tensione per poter stabilire quale garantisca le possibilità di disallineamento migliori e di poter verificarne il comportamento sotto carico. Una volta effettuate le prove con le due diverse configurazioni delle bobine, si può procedere con la scelta della tipologia più adatta all'alimentazione dinamica del veicolo e il dimensionamento dell'impianto.

3.1.4 Cedrat Flux 11.2

Prima di proseguire con i risultati delle varie simulazioni, si vuole dare una breve descrizione del software utilizzato e dei procedimenti che utilizza. Flux 11.2 è un software basato sul metodo agli elementi finiti (FEM), una tecnica numerica per risolvere i problemi con un certo grado di approssimazione, date alcune condizioni al contorno. Vengono utilizzati dei metodi che calcolano la variazione per minimizzare la funzione di errore e fornire una soluzione stabile. Analogamente all'idea di approssimare una circonferenza ad una serie di segmenti, il FEM comprende tutti i metodi per connettere molte equazioni legate ad un semplice elemento a piccoli sottodomini, chiamati elementi finiti, per approssimare un'equazione più complessa di dominio più esteso. In generale nella discretizzazione ottenuta, si ottiene che l'area di studio viene divisa in

elementi finiti non sovrapposti, i cui lati si intersecano nei nodi. Questo permette l'analisi di geometrie più o meno complesse, che risulterebbero altrimenti analiticamente impossibili.

Formulazioni Il software permette la selezione tra tre diverse formulazioni possibili a seconda del tipo di applicazione che si vuole simulare: magnetica, elettrica o termica. Con la prima si può focalizzare l'attenzione su entrambi i campi magnetico ed elettrico e la loro interazione, fornendo una soluzione completa dal punto di vista elettromagnetico. La seconda, invece, permette di concentrarsi sulla carica elettrica senza tenere conto dei fenomeni magnetici associati, senza considerare il campo magnetico prodotto. Con le formulazioni termiche invece si può associare ai fenomeni sopra descritti il punto di vista termico, con i trasferimenti di calore che avvengono solo per conduzione. Per ogni tipologia sono disponibili a loro volta altre tre categorie che includono o meno la variabile del tempo: il caso stazionario, quasi-stazionario e transitorio. Quella adatta a questo lavoro è la formulazione quasi-stazionaria magnetica, che permette l'utilizzo di correnti sinusoidali a frequenza fissata e simula le correnti indotte, l'effetto pelle e l'effetto di prossimità.

Steady-state AC Magnetic Per risolvere il problema in tre dimensioni è necessario appoggiarsi al modello scalare, proposto in automatico dal software. L'equazione

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

permette l'introduzione di diversi potenziali scalari Φ , come $\vec{H} = -\nabla\Phi + \vec{T}$. Il gradiente rappresenta la parte non rotazionale del campo \vec{H} , mentre il termine \vec{T} può esserlo o no. Il vettore \vec{T} può essere scelto tra diverse opzioni che portano a diversi potenziali scalari. Il software prevede l'utilizzo di differenti formulazioni, ognuna associata ad una regione del problema, la cui forma generale è scritta come:

$$\nabla \cdot \left[\mu_r \mu_0 (-\nabla(\Phi) + \vec{T}) + \vec{B}_r \right] = 0,$$

dove Φ è il potenziale magnetico scalare in Ampere, con due potenziali associati Φ_{tot} e Φ_{red} , \vec{T} è il termine corrispondente alla sorgente di campo (o ad un vettore potenziale elettrico in A/m) e B_r è il flusso magnetico residuo dovuto a magneti permanenti, in Tesla.

La scelta del potenziale magnetico scalare è fatta rispetto alla presenza o meno di conduttori percorsi da correnti e dalla loro natura, meshata o meno. Altre formulazioni sono introdotte nel caso quasi-stazionario per poter trattare le regioni che possono essere interessate da correnti parassite, tuttavia queste non sono rese disponibili dal produttore.

Mesh Il software prevede la formazione di una mesh automatica, tuttavia per ottenere risultati migliori è opportuno creare ed assegnare dei valori che siano consoni alle dimensioni delle singole componenti. Per quanto riguarda il conduttore, poiché è formato da un filo Litz e la densità di corrente al suo interno è omogenea, si è deciso di

utilizzare la *non-meshed coil* per modellizzare questo aspetto e rendere più leggero il sistema. Inoltre, attorno all'apparato è stato creato un parallelepipedo che contenesse entrambi gli apparecchi e il traferro presente tra essi, in modo da riuscire a controllare meglio l'accuratezza della mesh. Per scegliere le dimensioni caratteristiche, sono state effettuate delle prove variando l'ampiezza dei singoli elementi e valutandone l'impatto sulle grandezze in gioco, in particolare il flusso. Per la scelta finale sono state prese in considerazione sia l'accuratezza che la pesantezza del modello, per un bilanciamento ottimale tra prestazioni e precisione.

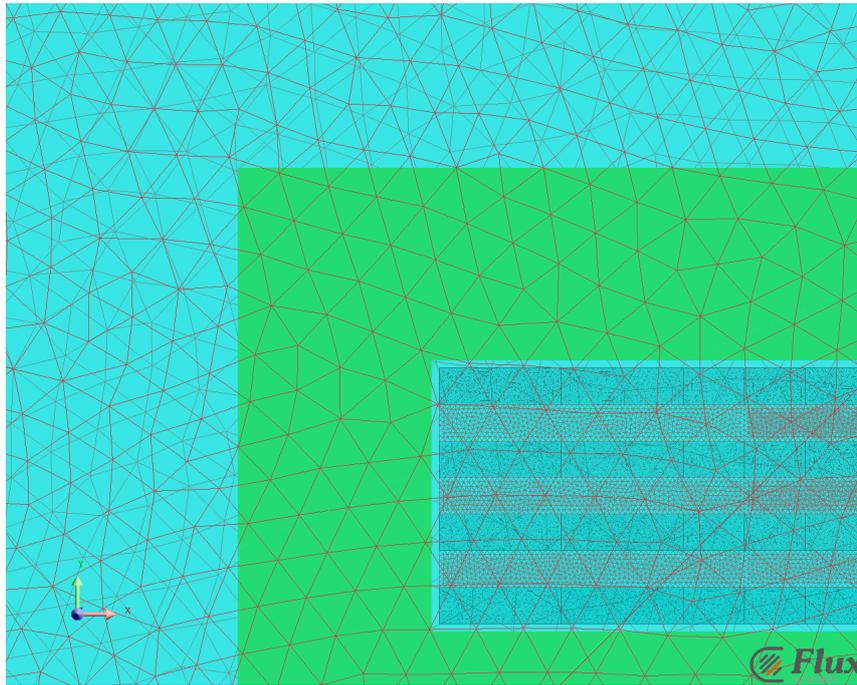


Figura 3.4: Particolare della mesh.

3.2 Pad rettangolare

3.2.1 Geometria

La prima geometria che si vuole analizzare per semplicità di studio è quella con bobina rettangolare. Per iniziare, si sono fissati i parametri geometrici delle ferriti poste solamente all'interno di essa. Questa non rappresenta la soluzione ideale per canalizzare al meglio il flusso, poiché viene concentrato solo nella parte interna, mentre all'esterno non è indirizzato e quindi il flusso disperso è maggiore. Tuttavia, la scelta effettuata è motivata dal mantenere ridotte le dimensioni e i costi, risparmiando in volume della ferrite, non incidendo fortemente sul rendimento del sistema, in quanto il flusso concatenato non aumenta consistentemente.

In base ai dati a disposizione e al fine di ottenere una dimensione finale del pad massima di 900x700 mm, si adottano 4 nuclei di ferrite, formati ciascuno da 5 elementi

in serie per un ingombro totale di 465 mm in lunghezza e 112 di larghezza, al netto delle spaziature. Quindi una volta dimensionato l'interno del nucleo si è posizionata al di sopra di esso la bobina rettangolare e si è compiuto uno studio preliminare degli accoppiamenti con una spaziatura tra le ferriti pari alla larghezza delle ferriti stessa, cioè 28 mm, al variare del numero di avvolgimenti. Alimentando singolarmente ed insieme le due bobine, si sono calcolate le induttanze dei singoli apparati e la mutua induttanza presente tra essi e, di conseguenza l'accoppiamento. I risultati ottenuti sono presentati in tabella.

N° spire	L_1 [mH]	L_2 [mH]	M [μ H]	A [m ²]	k	k/A
16	0,180	0,180	38	0,292	0,209	0,715
18	0,226	0,227	51	0,323	0,224	0,694
20	0,278	0,278	66	0,355	0,238	0,672
22	0,336	0,334	85	0,388	0,253	0,653
24	0,397	0,398	107	0,423	0,268	0,635
26	0,468	0,467	132	0,459	0,282	0,614
28	0,544	0,544	160	0,497	0,295	0,593
30	0,629	0,626	193	0,536	0,308	0,574

Sulla base dei valori ricavati, si può notare che sia l'autoinduttanza che la mutua crescono con un andamento che si avvicina alla linearità. Tuttavia, l'aumento della mutua è leggermente più incidente nel calcolo dell'accoppiamento nei primi incrementi del numero di spire, quindi è conveniente lavorare in questa zona. Per quanto riguarda il rapporto tra il k e l'area del pad, si assiste ad un decremento lineare, perciò minore è l'area del pad, maggiore è il suo sfruttamento. Quindi per la scelta del numero di spire, ci si pone su un compromesso ottenuto considerando un buon rapporto tra l'area del pad e il k e il coefficiente stesso, per non avere valori troppo bassi. Il numero di avvolgimenti che corrisponde a queste caratteristiche è di 22 spire, a cui corrisponde a sua volta un k di 0,253.

Una volta fissato questo parametro è possibile studiare la variazione delle induttanze in funzione delle spaziature presenti tra le ferriti (FERR_SPACE) e tra le ferriti e la bobina (COIL_SPACE). I valori determinati per lo studio della prima variabile corrispondono a multipli della larghezza della ferrite, mentre per la seconda si è proceduto a passi di 10 mm. I valori massimi sono stati stabiliti per rimanere nelle dimensioni che si sono prefissate di rispettare. Anche in questo caso, come si nota in figura 3.5, gli andamenti ricavati per il coefficiente di accoppiamento sono con buona approssimazione lineari, quindi la scelta da effettuare non risulta univoca ma rappresenta un compromesso tra le diverse variabili in gioco.

La scelta è ricaduta su una spaziatura tra le ferriti pari a 42 mm, una volta e mezza la larghezza delle stesse, e 26 mm con l'avvolgimento. Questo garantisce un rapporto ottimale tra accoppiamento e ingombri spaziali. Le induttanze ricavate sono pari a $L_1 = 0,39745$ mH, $L_2 = 0,39704$ mH e la mutua $M = 0,11429$ mH. Il coefficiente di accoppiamento risulta 0,288, la resistenza di un avvolgimento, invece, è di 31,6272 m Ω . Gli ingombri spaziali del sistema totali sono di 811,8 mm in larghezza, 584,8 mm in lunghezza e 25 mm in altezza, per un'area totale di 0,474 m².

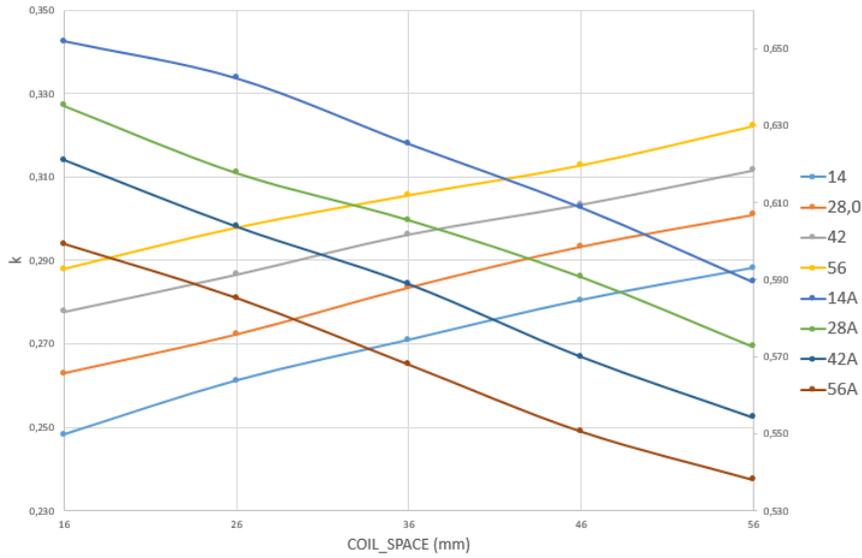


Figura 3.5: Grafico degli andamenti dei k .

Per una valutazione preliminare dei valori di campo magnetico limiti imposti dalla normativa, $6,25 \mu T$, si è verificato a quale distanza dall'apparato si presenta questo valore. Poiché sopra ad esso è presente il veicolo che, costruito in materiali ferromagnetici, ha anche una funzione schermante qui non considerata e sotto è presente la struttura di sostegno della strada, si considerano solamente le zone laterali adiacenti al sistema. In queste posizioni a circa un metro dal sistema, si riscontrano già le condizioni di sicurezza, quindi risulterebbe necessaria solo una blanda schermatura per proteggere eventuali pedoni presenti nelle immediate vicinanze del veicolo, durante l'alimentazione dello stesso.

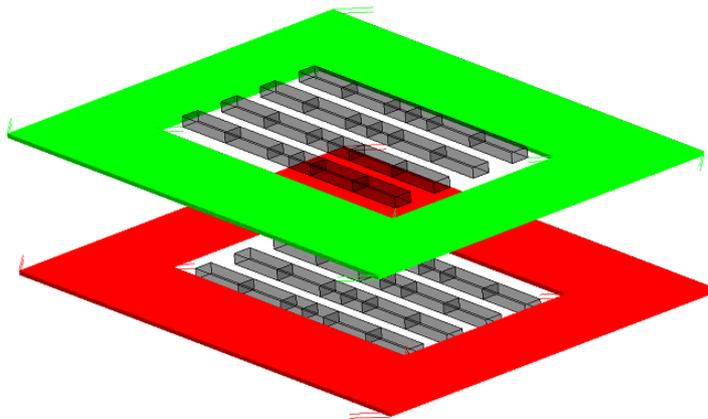


Figura 3.6: Modello prodotto in Flux.

3.2.2 Compensazione

Compensazione serie Ora che si sono definite le geometrie del sistema è possibile ricavare i parametri del circuito equivalente a T, per poter inserire la compensazione serie nel sistema.

	L [mH]	X_L [Ω]
L_a	0,283	151,224
L_b	0,283	151,006
M	0,114	61,040

Dalla condizione di risonanza, invertendo la formula che la descrive, si possono ricavare facilmente le capacità necessarie per compensare le induttanze L_a ed L_b :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad C = \frac{1}{\omega_0^2 L}$$

Tuttavia, come già anticipato, per il momento non è conveniente compensare perfettamente il sistema, poiché si va a lavorare in una condizione estremamente sensibile in caso di variazioni nell'alimentazione. Quindi in questa sede, si andrà a compensare una parte delle due reattanze in serie, che varia tra il 95% e il 100%, valido come termine di paragone ideale. In particolare si sono adottati i valori nella tabella per i condensatori.

COMP %	X_{L_a} [Ω]	X_{L_b} [Ω]	C_1 [nF]	C_2 [nF]
95	143,66	143,46	13,03	13,05
98	148,20	147,99	12,63	12,65
98,5	148,96	148,74	12,57	12,59
100	151,22	151,01	12,38	12,40

A questo punto è necessario fare una precisazione, poiché la sorgente e il ricevitore sono due pad completamente identici, sia dal punto di vista geometrico che da quello circuitale, quindi è lecito attendersi che le induttanze siano uguali. Per questo motivo si è deciso di utilizzare la stessa compensazione su entrambi i lati del sistema, in particolare C_2 , poiché si vuole essere più conservativi e porsi nel caso peggiore.

Si passa ora all'alimentazione del sistema sia con un generatore di corrente che con uno di tensione, al fine di determinare quale compensazione garantisca una completa interscambiabilità tra i due, per poter effettuare successivamente le prove di traslazione a parità di condizioni per un'analisi più accurata del comportamento. In tabella vengono inseriti i valori ricavati dalle simulazioni. Già da un primo semplice confronto tra le due diverse tipologie di alimentazione emergono risultati interessanti. Innanzitutto, il grado di compensazione cross-over è pari al 98,5%, infatti si ottengono risultati del tutto simili, quindi questa sarà la tipologia di compensazione utilizzata nelle prove di traslazione tra i due pad. Partendo dal generatore di corrente, si può verificare che la potenza attiva fornita si mantiene molto più costante rispetto a quello di tensione, che subisce oscillazioni molto più marcate a causa della corrente che è limitata dalla tensione applicata. Tuttavia, questo aspetto comporta un necessario sovradimensionamento dell'alimentatore in corrente, che deve essere in grado di sostenere più alte

tensioni e carichi reattivi associati. Ovviamente, più ci si avvicina alla compensazione perfetta meno sarà necessario sovradimensionare il generatore. Le tensioni applicate quindi agli avvolgimenti, causate dalle correnti circolanti in esse, mantengono quindi la stessa variabilità della potenza trasmessa. Da notare, che quelle al secondario, poiché sono indotte dal primario, risultano leggermente inferiori a causa della non perfetta concatenazione dei flussi. Questo comportamento si riflette in ultima istanza anche sul carico, diretta conseguenza dell'impedenza vista dal lato primario che determina la corrente circolante, nel caso del generatore di tensione.

GENERATORE DI CORRENTE 76 A					
Compensazione	95%	98%	98,5%	100%	
Tensione [<i>Source</i>]	1199,93	636,90	560,56	401,32	V
Corrente [<i>Source</i>]	76,00	76,00	76,00	76,00	A
Attiva [<i>Source</i>]	23603	27030	27629	29708	W
Reattiva [<i>Source</i>]	88088	40154	32428	6906	VAR
Apparente [<i>Source</i>]	91195	48404	42602	30501	W
φ [<i>Source</i>]	75,00	56,05	49,57	13,09	°
Tensione [L_1]	12084	11801	11753	11592	V
Tensione [L_2]	9645	10650	10819	11392	V
Tensione [R_L]	348,92	373,49	377,62	391,62	V
Corrente [R_L]	67,18	71,91	72,70	75,40	A
Attiva [R_L]	23440	26857	27454	29527	W
Rendimento	99,31	99,36	99,37	99,39	%

GENERATORE DI TENSIONE 566 V					
Compensazione	95%	98%	98,5%	100%	
Tensione [<i>Source</i>]	566,00	566,00	566,00	566,00	V
Corrente [<i>Source</i>]	35,85	67,54	76,74	107,19	A
Attiva [<i>Source</i>]	5251	21347	28168	59091	W
Reattiva [<i>Source</i>]	19599	31712	33061	13736	VAR
Apparente [<i>Source</i>]	20290	38228	43434	60667	W
φ [<i>Source</i>]	75,00	56,05	49,57	13,09	°
Tensione [L_1]	5700	10487	11867	16349	V
Tensione [L_2]	4549	9465	10924	16066	V
Tensione [R_L]	164,58	331,91	381,29	552,31	V
Corrente [R_L]	31,69	63,90	73,41	106,34	A
Attiva [R_L]	5215	21210	27990	58731	W
Rendimento	99,31	99,36	99,37	99,39	%

Ci sono però alcune somiglianze che è bene evidenziare, in quanto riflettono il comportamento del sistema a prescindere dalla sua alimentazione. In primo luogo, lo sfasamento presente tra tensione e corrente dipende esclusivamente dal grado di compensazione come ci si aspetterebbe. Un altro effetto dato dal tipo di compensazione

effettuata è senza dubbio la presenza di una parte di potenza reattiva comunque presente, anche nel caso di compensazione totale. Questo è dovuto al fatto che resta comunque la mutua induttanza tra gli avvolgimenti che assorbe comunque potenza reattiva e sfasa di conseguenza il carico. L'aspetto più rilevante, tuttavia, risiede nella perfetta uguaglianza tra i rendimenti a parità di compensazione e la loro sostanziale invarianza, indicante che la potenza trasmessa dipende in modo decisivo dall'accoppiamento magnetico del sistema e non da altri parametri circuitali e non.

L'ultimo aspetto da analizzare è il confronto dei casi ideali: con il generatore di tensione non si è più in grado di controllare la corrente che raggiunge valori molto più elevati, mentre con il generatore di corrente si è in grado di limitare al minimo il sovradimensionamento dovuto alla tensione generata. Il fatto di non compensare completamente la potenza reattiva in gioco permette comunque di avvicinarsi notevolmente alle condizioni di compensazione perfetta, poiché in ogni caso c'è un margine di potenza che andrebbe a bilanciare l'eventuale potenza capacitiva erogata dai condensatori. Tuttavia, con questa tipologia di avvolgimenti, l'interesse in una comparazione tra le due alimentazioni in caso di disallineamenti porta comunque a scegliere la compensazione al 98,5%.

Compensazione parallelo Per introdurre la compensazione parallelo, è necessario ricondursi al circuito equivalente a II.

	L [mH]	X_L [Ω]
L_a	0,512	273,393
L_b	0,511	272,999
M^*	1,266	676,340

In questo caso, vista l'elevata reattanza M^* non compensata, si considera solo il caso di perfetta compensazione. Ciò conduce a due condensatori di 6,85 e 6,86 nF, di cui si utilizza quello con capacità maggiore per le motivazioni elencate precedentemente. Si è effettuata la prova con l'alimentazione con entrambe le tipologie di generatore. Tuttavia, i risultati ottenuti sono poco incoraggianti, poiché la compensazione così effettuata, unica possibilità per trasferire il carico correttamente al primario, conduce ad uno sfasamento pari a 89,5°. Infatti, a fronte di 30 kW trasmessi, si ha una potenza reattiva di quasi 4 MVAR, che causa a sua volta una tensione applicata al generatore di 51,8 kV. Con il generatore di tensione, invece, a fronte di un'impedenza equivalente di 676,360 Ω , si ricava una corrente efficace pari a 0,830 A, ben lontano dai 76 A richiesti dal sistema. Non è quindi ipotizzabile l'utilizzo di questo genere di compensazione poiché sarebbero necessari dei sovradimensionamenti troppo eccessivi, di due ordini di grandezza superiori. La scelta del collegamento della compensazione ricade quindi su quella serie.

3.2.3 Risposta ai disallineamenti

Si vuole studiare ora il comportamento ai disallineamenti di questa configurazione, sia con il generatore di corrente che con quello di tensione, al fine di stabilire quale sia il più adatto a questo genere di applicazione. Prima di mostrare i risultati, è necessario descrivere ciò che avviene a livello circuitale nel sistema. Traslando il pad ricevitore si va ad influenzare la concatenazione dei flussi da parte di quest'ultimo. Così facendo si incide sulla mutua induttanza che si crea tra i due avvolgimenti, in particolare la si diminuisce. Questo si riflette sul circuito equivalente in due modi: il primo consiste nella diminuzione della reattanza X_M , mentre il secondo fa aumentare le induttanze equivalenti L_a e L_b , rendendo minore il grado di compensazione da parte dei condensatori. Tutto ciò, provoca un aumento della impedenza totale vista dal generatore che provoca gli effetti già notati nelle prove di compensazione.

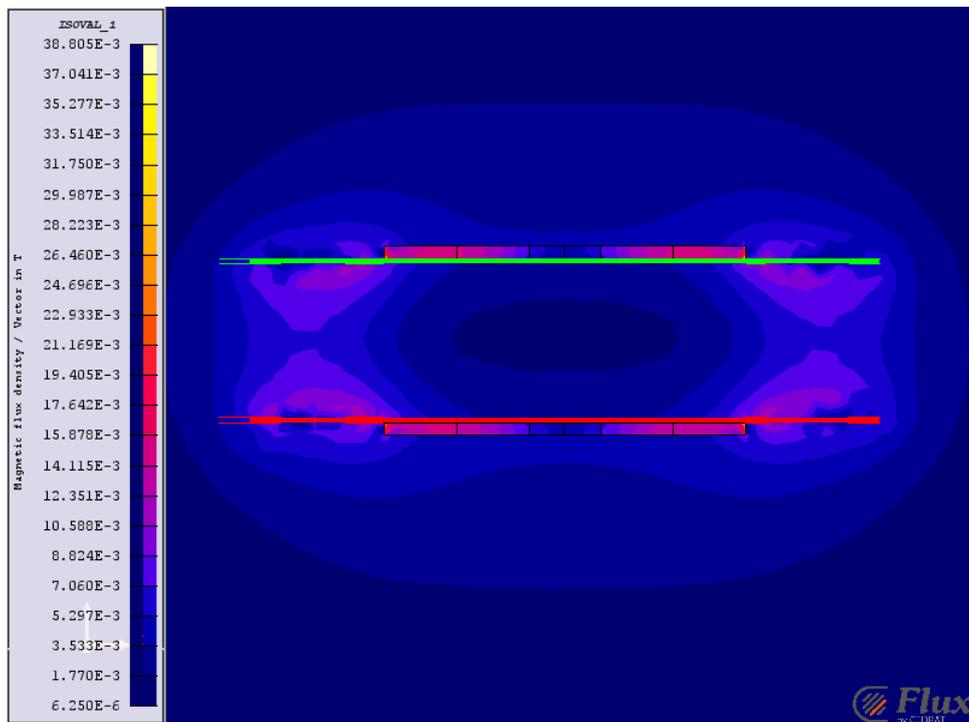


Figura 3.7: Campo magnetico lungo il piano XZ.

Traslazione trasversale Si è iniziato simulando i disallineamenti lungo l'asse trasversale a quello di marcia, denominato x, con un passo di 2,5% (20 mm) fino alla metà della larghezza del pad, con il 5% fino alla totalità della stessa. Si sono calcolate le correnti, le tensioni e le potenze erogate dal generatore, si è studiato l'accoppiamento magnetico con le formulazioni già elencate precedentemente e sono stati valutati i valori di tensione e corrente al carico equivalente.

Pos [%]	I [A]	P [W]	Q [VAR]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]	k	η [%]
0	80,78	31595	33048	403,82	77,75	31396	0,287	99,37
2,5	78,13	29287	33132	388,79	74,85	29102	0,286	99,37
5	68,42	21695	32079	334,60	64,42	21555	0,281	99,36
7,5	55,72	13924	28299	268,05	51,61	13833	0,276	99,34
10	48,76	10472	25532	232,45	44,75	10403	0,274	99,34
12,5	38,34	6000	20855	175,93	33,87	5959	0,263	99,31
15	33,49	4334	18452	149,50	28,78	4303	0,256	99,29
20	23,06	1725	12938	94,29	18,15	1712	0,235	99,21
25	18,32	941	10326	60,90	13,40	933	0,218	99,13
30	14,99	519	8466	51,65	9,94	514	0,198	99,01
35	13,10	311	7407	39,94	7,69	307	0,175	98,83
40	11,69	194	6614	31,53	6,07	191	0,155	98,59
45	10,75	123	6082	25,00	4,81	120	0,133	98,21
50	9,92	73	5617	19,20	3,70	71	0,111	97,56
55	9,60	47	5431	15,32	2,95	45	0,092	96,59
60	9,27	28	5244	11,74	2,26	27	0,073	94,86
65	8,99	15	5090	8,42	1,62	14	0,054	91,18
70	8,94	8	5060	5,72	1,10	6	0,037	83,06
75	9,00	3	5094	3,22	0,62	2	0,021	60,74
80	8,99	2	5088	1,20	0,23	0	0,008	17,93
85	8,78	1	4982	0,29	0,06	0	0,002	1,29
90	8,97	2	5076	1,36	0,26	0	0,009	21,85
95	9,01	2	5100	1,99	0,38	1	0,013	37,27
100	8,96	2	5072	2,33	0,45	1	0,015	45,15

Nel caso di utilizzo del generatore di tensione, si possono osservare diverse peculiarità frutto di questa scelta. A causa dell'aumento progressivo dell'impedenza citato precedentemente, l'andamento della corrente cala in modo abbastanza repentino, fino a giungere ad un plateau intorno ai 9 A. Questo accade poiché la reattanza X_M , diventa talmente piccola da essere vista come un cortocircuito, cioè il secondario non concatena più abbastanza flusso per indurre una tensione sufficientemente alta e, quindi, la corrente risultante non varia più sensibilmente. Analogamente, seguono questo andamento anche la potenza attiva e reattiva, cambiando però le proporzioni tra loro: all'inizio sono sostanzialmente equidistribuite, mano a mano che ci si allontana la potenza reattiva aumenta fino ad essere coincidente con quella apparente. Di interesse è l'andamento del coefficiente k : si nota la presenza di un punto di annullamento intorno all'85% della larghezza del pad, oltre il quale l'accoppiamento inizia ad aumentare nuovamente ma con valori molto piccoli, infatti non vi è potenza trasmessa. Quest'ultima è il parametro che maggiormente interessa per verificare la bontà del collegamento. Il suo andamento è molto ripido, infatti già per disallineamenti poco marcati, intorno al 25%, la potenza trasmessa è minore di 1 kW. Il rendimento, invece, mantiene rendimenti elevati fin oltre la metà del pad, salvo poi calare bruscamente in prossimità del punto di annullamento, questo a causa delle perdite sempre maggiori in proporzione alla potenza trasmessa.

Dopo questo punto, riprende a crescere altrettanto rapidamente, ma in una zona di scarso interesse pratico. Si nota anche una potenza iniziale maggiore di 30 kW, dovuta al fatto che il generatore non limita la corrente circolante.

Il grande pregio dell'alimentazione in tensione è quello di non necessitare di sovradimensionamenti ulteriori a quello del caso di allineamento nullo, in quanto è in quel punto che si riscontra la massima potenza apparente richiesta. Il difetto principale è quello di non riuscire a sostenere potenze adeguate oltre il 10% di disallineamento, che equivale a circa 8 cm, decisamente troppo poco per una sua implementazione nella sede stradale. Si passa ora ad analizzare l'alimentazione tramite un generatore di corrente, da cui ci si aspetta senza dubbio maggiori tensioni e potenze reattive in gioco, una uguaglianza perfetta nei coefficienti di accoppiamento e, di conseguenza, nei rendimenti.

Pos [%]	V [V]	P [W]	Q [VAR]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]	k	η [%]
0	532,52	27967	29253	379,93	73,15	27791	0,287	99,37
2,5	550,58	27713	31352	378,19	72,81	27538	0,286	99,37
5	628,69	26767	39579	371,67	71,56	26595	0,281	99,36
7,5	695,21	26600	45652	370,50	71,33	26428	0,280	99,35
10	882,26	25445	62036	362,34	69,76	25277	0,274	99,34
12,5	1141,18	23406	83511	347,46	66,90	23244	0,262	99,31
15	1284,54	22322	95039	339,29	65,32	22163	0,256	99,29
17,5	1583,82	20637	118588	326,18	62,80	20484	0,246	99,26
20	1865,35	18739	140522	310,75	59,83	18592	0,235	99,21
22,5	2067,11	17817	156087	302,96	58,33	17671	0,229	99,19
25	2348,13	16193	177722	288,76	55,59	16053	0,218	99,13
27,5	2644,36	14759	200429	275,59	53,06	14623	0,208	99,08
30	2870,36	13341	217739	261,93	50,43	13209	0,198	99,01
32,5	3077,88	11651	233629	244,66	47,10	11524	0,185	98,91
35	3284,06	10462	249369	231,74	44,62	10339	0,175	98,83
37,5	3444,59	9236	261626	217,61	41,90	9117	0,164	98,71
40	3679,11	8206	279492	204,98	39,46	8090	0,155	98,59
42,5	3865,89	6996	293725	189,08	36,40	6883	0,143	98,39
45	4002,46	6127	304125	176,79	34,04	6018	0,133	98,21
47,5	4106,57	5129	312057	161,51	31,09	5022	0,122	97,92
50	4292,25	4308	326183	147,77	28,45	4204	0,112	97,58
55	4482,96	2934	340692	121,32	23,36	2834	0,092	96,59
60	4649,03	1820	353322	94,61	18,22	1723	0,071	94,69
65	4731,89	1058	359622	70,75	13,62	964	0,053	91,09
70	4811,94	548	365707	48,60	9,36	455	0,037	83,06
75	4779,17	234	363217	27,15	5,23	142	0,021	60,74
80	4785,46	111	363695	10,19	1,96	20	0,008	17,93
85	4809,27	93	365504	2,60	0,50	1	0,002	1,40
90	4801,66	117	364926	11,50	2,21	25	0,009	21,79
95	4773,83	146	362811	16,80	3,24	54	0,013	37,27
100	4800,74	167	364856	19,79	3,81	75	0,015	45,15

La prima cosa che balza all'occhio è, come previsto, l'inesorabile aumento delle tensioni e della potenza reattiva in gioco, all'aumentare del disallineamento. Tuttavia, mantenere la corrente costante provoca l'invarianza del flusso prodotto che, quindi, viene concatenato in maggior quantità rispetto al caso precedente, inducendo più tensione al secondario e aumentando la potenza trasmessa. Come ci si aspettava, l'accoppiamento magnetico non dipende dal tipo di generatore utilizzato, quindi sia k che il rendimento sono uguali al caso con il generatore di tensione. La potenza trasmessa, infine, presenta un andamento calante molto più smussato e dolce, che permette di trasferire 10 kW con un disallineamento intorno al 35%, annullandosi completamente anche in questo caso all'85%.

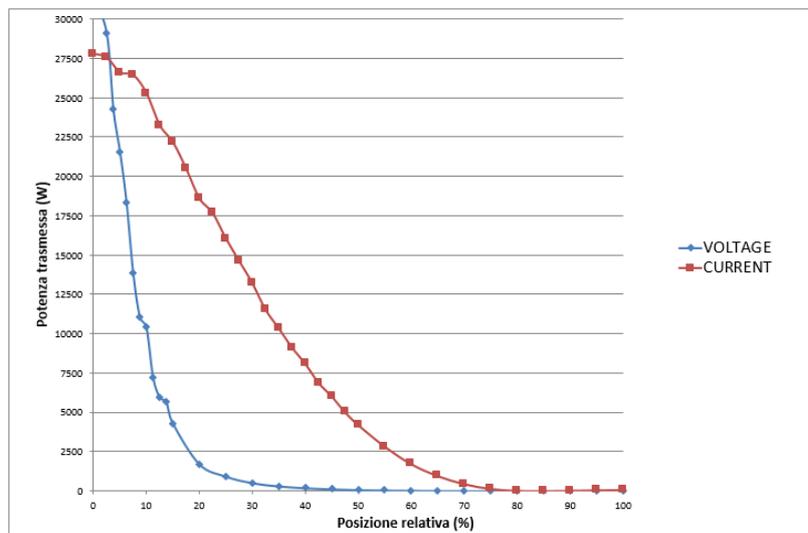


Figura 3.8: Potenza trasmessa nei due casi studiati.

Come si vede dal grafico in figura 3.8, la soluzione più adatta all'uso in strada è quella con generatore di corrente, anche se è necessario prevedere un sovradimensionamento cospicuo dell'apparato, pari a circa 250 kVA, per sostenere la trasmissione di potenza con un disallineamento di circa un terzo della larghezza (30 cm), trasferendo al contempo 10 kW al veicolo.

Traslazione longitudinale Si prosegue ora valutando l'impatto della traslazione lungo l'asse di marcia del veicolo, analogamente a quanto fatto finora. Ci si aspetta un comportamento simile al variare della sorgente di alimentazione, inoltre si vuole valutare per quali disallineamenti la geometria del sistema riesca a garantire determinate prestazioni. Si inizia analizzando il comportamento con l'alimentatore in tensione. Si confermano tutti gli aspetti evidenziati in precedenza, con una potenza trasmessa che cala repentinamente, intorno al 10% si trasmettono solamente 10 kW e già dal 20% di disallineamento la corrente erogata dalla sorgente cala lentamente fino a raggiungere il plateau situato sempre a circa 9 A. Il punto di annullamento lungo quest'asse è perfettamente visibile all'80%, pari a 47 cm di distanza, un valore buono in un'ottica di pavimentazione della sede stradale poiché permette un distanziamento discreto tra due pad successivi, permettendo di risparmiare sui costi e sul materiale.

Pos [%]	I [A]	P [W]	Q [VAR]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]	k	η [%]
0	80,78	31595	33048	403,82	77,75	31396	0,287	99,37
2,5	75,29	26951	33012	372,96	71,81	26780	0,284	99,36
5	72,78	25595	32276	363,46	69,98	25434	0,287	99,37
7,5	65,98	20459	31245	324,94	62,56	20328	0,283	99,36
10	59,98	11611	26415	244,77	47,12	11534	0,276	99,34
12,5	45,65	8909	24254	214,39	41,28	8849	0,269	99,33
15	39,09	6419	21172	181,97	35,03	6375	0,267	99,32
17,5	32,32	3977	17856	143,21	27,57	3949	0,254	99,28
20	26,70	2475	14911	112,95	21,75	2456	0,243	99,24
22,5	22,66	1673	12714	92,86	17,88	1660	0,235	99,21
25	20,97	1343	11794	83,16	16,01	1332	0,228	99,18
27,5	18,37	914	10356	68,60	13,21	906	0,214	99,11
30	16,50	665	9314	58,48	11,26	658	0,203	99,05
32,5	15,04	497	8498	50,54	9,73	492	0,193	98,98
35	13,90	360	7857	42,98	8,27	356	0,177	98,85
37,5	12,88	272	7285	37,38	7,20	269	0,167	98,74
40	12,18	209	6889	32,71	6,30	206	0,154	98,58
42,5	11,57	162	6547	28,79	5,54	160	0,143	98,39
45	11,29	134	6390	26,14	5,03	132	0,133	98,20
47,5	10,77	94	6096	21,86	4,21	92	0,116	97,75
50	10,33	72	5846	19,10	3,68	70	0,106	97,37
60	9,26	21	5239	10,09	1,94	20	0,063	93,26
70	9,02	4	5106	3,97	0,76	3	0,025	70,03
80	8,99	1	5087	0,05	0,01	0	0,000	0,05
90	8,96	2	5071	2,36	0,45	1	0,015	45,78
100	8,99	3	5087	3,30	0,64	2	0,021	62,07

È da evidenziare però che le prove effettuate comprendevano valori della traslazione fino ad una volta e mezza la lunghezza del pad, tuttavia in questa sede si sono omessi poiché confermavano ulteriormente l'andamento ottenuto dal 50% in avanti, cioè con qualche watt di potenza trasmessa. Regione di spazio nella quale, quindi, non si riesce a far lavorare il sistema in quanto non c'è ai fini pratici trasmissione di potenza. L'unica differenza emersa riguarda il rendimento che sale fino ad un 70% per poi calare lentamente, ma come detto non è una zona d'interesse.

Passando quindi ad un generatore di corrente, si riscontrano delle identità nel comportamento sia dell'accoppiamento che del rendimento, come ci si aspettava. Le tensioni e le potenze reattive in gioco aumentano all'aumentare della distanza, come avveniva nel caso della traslazione trasversale. I 10 kW tenuti come valor minimo accettabile si ottengono ad un disallineamento del 35%, con una potenza apparente di dimensionamento pari a 235 kVA, circa sei volte quella nominale ed una tensione di 3 kV. I rendimenti in questa zona di regione sono superiori al 98,5%. In questo caso è interessante notare come si mantenga l'ordine di centinaia di Watt come potenza trasmessa anche oltre una volta la dimensione del pad.

Pos [%]	V [V]	P [W]	Q [VAR]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]	k	η [%]
0	533	27967	29253	379,93	73,15	27791	0,287	99,37
2,5	571	27459	33634	376,45	72,48	27284	0,284	99,36
5	591	27911	35196	379,55	73,07	27736	0,287	99,37
7,5	652	27142	41450	374,26	72,06	26968	0,283	99,36
10	844	25805	58708	364,90	70,25	25635	0,276	99,34
12,5	942	24693	67222	356,92	68,72	24527	0,269	99,33
15	1101	24266	80042	353,81	68,12	24101	0,267	99,32
17,5	1331	21991	98727	336,75	64,83	21833	0,254	99,28
20	1611	20044	120769	321,44	61,89	19892	0,243	99,24
22,5	1899	18829	143059	311,49	59,97	18681	0,235	99,21
25	2051	17632	154890	301,38	58,03	17488	0,228	99,18
27,5	2342	15649	177289	283,83	54,65	15511	0,214	99,11
30	2607	14106	197656	269,39	51,87	13972	0,203	99,05
32,5	2860	12688	217003	255,40	49,17	12559	0,193	98,98
35	3095	10762	235008	235,06	45,26	10638	0,177	98,85
37,5	3340	9487	253650	220,58	42,47	9367	0,167	98,74
40	3533	8138	268361	204,13	39,30	8022	0,154	98,58
42,5	3718	6996	282446	189,08	36,40	6883	0,143	98,39
45	3809	6070	289441	175,95	33,87	5960	0,133	98,20
47,5	3994	4684	303473	154,21	29,69	4578	0,116	97,75
50	4165	3906	316499	140,55	27,06	3803	0,106	97,37
60	4648	1416	353211	82,81	15,94	1320	0,063	93,26
70	4769	307	362413	33,42	6,43	215	0,025	70,03
80	4786	91	363721	0,46	0,09	0	0,000	0,05
90	4801	169	364886	20,04	3,86	77	0,015	45,78
100	4786	242	363744	27,93	5,38	150	0,021	62,07

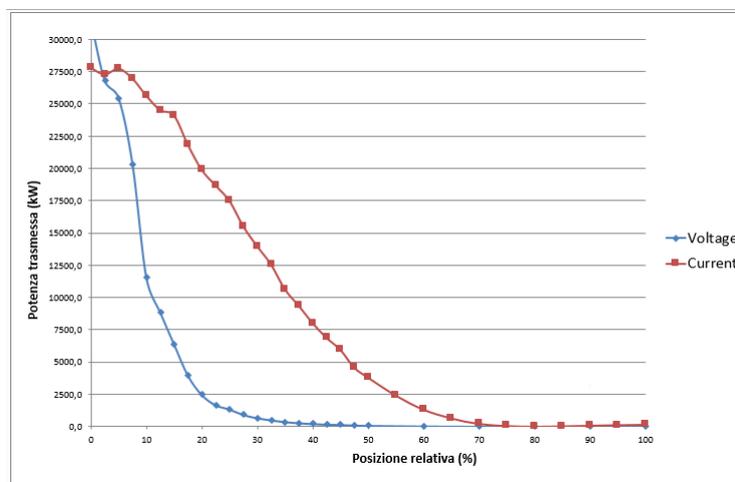


Figura 3.9: Potenza trasmessa nei due casi studiati.

Per concludere l'analisi di questa configurazione delle bobine, si sceglie quindi di alimentare il sistema con un generatore di corrente per la maggior capacità di trasmissione in presenza di disallineamenti, anche se porta in dote un necessario sovradimensionamento del generatore stesso. Le prestazioni del sistema risultano ad ogni modo eccellenti, con rendimenti del sistema, escludendo la parte di elettronica di potenza e conversione, superiori al 95%. Per migliorare ulteriormente le prestazioni del pad in questi casi, l'accorgimento che si può adottare è quello di aumentare la dimensione del pad sorgente lungo la quale si deve incrementare l'accoppiamento. Non a caso infatti, sono state sviluppate delle soluzioni che prevedono l'utilizzo di una "rotaia" di alimentazione. Tuttavia, i rendimenti totali del sistema saranno inferiori, poiché aumentano le perdite associate sia nel flusso che nel circuito a fronte di un miglioramento del profilo di potenza.

Dando un rapido sguardo al prosieguo del lavoro, in un'ottica di implementazione nella sede stradale, il parametro fondamentale per garantire un potenza media trasmessa e una fluttuazione non eccessiva della stessa è la distanza tra due pad. Per effettuare un'analisi preliminare, si consideri come perfettamente lineare il sistema in modo da poter applicare la sovrapposizione degli effetti. Ad esempio, affiancando completamente due sorgenti si otterrebbero 8 kW scarsi di potenza trasmessa, in questo caso semplificato. Quindi, se si volesse utilizzare questa geometria, si consiglia di applicare questa configurazione, in quanto è quella che garantisce la minima escursione di potenza, sebbene sia già molto consistente.

3.3 DD Pad

3.3.1 Geometria

Si procede ora con il dimensionamento di una diversa configurazione delle bobine, denominata a doppia D, che consiste nel dividere la bobina rettangolare in due avvolgimenti separati, ciascuno a forma rettangolare e successivamente affiancati. Questa geometria permette di aumentare il flusso concatenato, raddoppiando le bobine, e di creare delle linee di flusso molto più alte, pari a circa metà della larghezza. Inoltre, con questa configurazione si minimizza il flusso non concatenato all'esterno del sistema, ciò grazie al miglior sfruttamento delle ferriti poste al di sotto degli avvolgimenti. Queste, infatti, sono percorse in tutta la loro lunghezza dal flusso, non come avveniva nel caso precedente, dove erano interessate solo nelle parti terminali. Durante un primo dimensionamento, effettuato con lo stesso nucleo ferromagnetico del pad rettangolare aggiungendo solo un nucleo di ferrite, il software manifestava problemi di convergenza dei metodi iterativi per la soluzione della parte non lineare. Questo avveniva poiché le ferriti si trovavano a lavorare in condizioni di saturazione eccessiva, non gestibili dal calcolatore utilizzato. Sempre rispettando i limiti di dimensioni definiti precedentemente, si è deciso, per far fronte all'aumento del flusso concatenato, stimato dai pochi risultati ottenuti in almeno il 40-60%, di aumentare il volume di ferrite impiegato. Si utilizzeranno infatti 5 moduli da 93x42x16 mm, allargando del 50% la larghezza, aggiungendo anche un nucleo di ferrite, per un totale di 5. L'ingombro che si ricava è

sempre di 465 mm in larghezza mentre risulta di 210 mm in lunghezza. Si continua quindi posizionando al di sopra di esso le due bobine rettangolari, con l'avvertenza di orientarle in modo che la corrente che fluisce nei due lati adiacenti sia concorde. In caso contrario si avrebbe l'annullamento del flusso prodotto.

Una volta costruito il modello, con una spaziatura preliminare tra le ferriti di 28 mm, si è calcolato il numero di spire che garantisce il giusto compromesso tra accoppiamento e dimensioni. Durante queste simulazioni, si è stabilito di collegare le bobine in parallelo tra loro, imponendo una corrente di 1 A su entrambe quelle appartenenti allo stesso lato e aprendo quello opposto alternativamente. La scelta sul collegamento è ricaduta sul parallelo poiché, in questo modo, la tensione applicata sull'alimentazione è dimezzata rispetto al collegamento serie, visti anche i valori ottenuti precedentemente. Nel modello si sono riferite alla stessa *coil conductor* gli avvolgimenti presenti sullo stesso pad, in questo modo si pongono automaticamente in parallelo e vengono trattati dal software come un'unica entità sulla quale calcolare i flussi concatenati. Così facendo, si semplifica notevolmente lo studio ridotto ad un sistema di due bobine anziché di quattro, potendosi riferire di conseguenza alle formulazioni utilizzate nel caso precedente. Si analizzeranno numeri di spire inferiori poiché è necessario garantire all'interno delle singole D uno spazio adeguato per poter far richiudere il flusso su sé stesso, da 14 a 24 spire.

N° spire	L_1 [mH]	L_2 [mH]	M [mH]	A [m ²]	k	k/A
14	0,409	0,409	0,112	0,423	0,275	0,649
16	0,504	0,503	0,145	0,464	0,287	0,620
18	0,604	0,605	0,180	0,506	0,299	0,590
20	0,707	0,709	0,218	0,551	0,308	0,560
22	0,813	0,814	0,258	0,597	0,318	0,532
24	0,919	0,921	0,299	0,645	0,326	0,505

I risultati ottenuti seguono l'andamento di quelli del pad rettangolare infatti, sia l'auto che la mutua induttanza rispecchiano andamenti simili alla linearità. Quest'ultima, inoltre, ha una maggior influenza sul calcolo del coefficiente di accoppiamento, però in questo caso anche il suo andamento è sostanzialmente lineare. Quindi anche per il rapporto k su area si ricava una linearità a meno di piccole variazioni. Anche in questo caso quindi, la scelta deve essere effettuata sulla base di un compromesso tra dimensioni e accoppiamento magnetico. Il numero di avvolgimenti scelto è di 18 spire, per un k di 0,299.

Si passa quindi ora alla valutazione degli effetti che hanno le spaziature tra le ferrite e tra il nucleo ferromagnetico e l'avvolgimento sulle induttanze e, di conseguenza sull'accoppiamento. I valori utilizzati per l'intervallo tra le ferriti sono multipli della larghezza delle ferriti stessa, mentre per il secondo si è proceduto a passi di 1 cm. Come si può vedere in figura 3.10, gli andamenti ricavati sono sostanzialmente lineari, quindi la scelta della geometria deve essere fatta non seguendo l'ottimo tecnico per garantire il massimo accoppiamento, ma valutandone l'impatto sulle dimensioni del sistema.

Come si può notare dagli andamenti nel grafico, il coefficiente k aumenta in modo sostanzialmente lineare all'accrescimento delle dimensioni del pad, mentre il rapporto

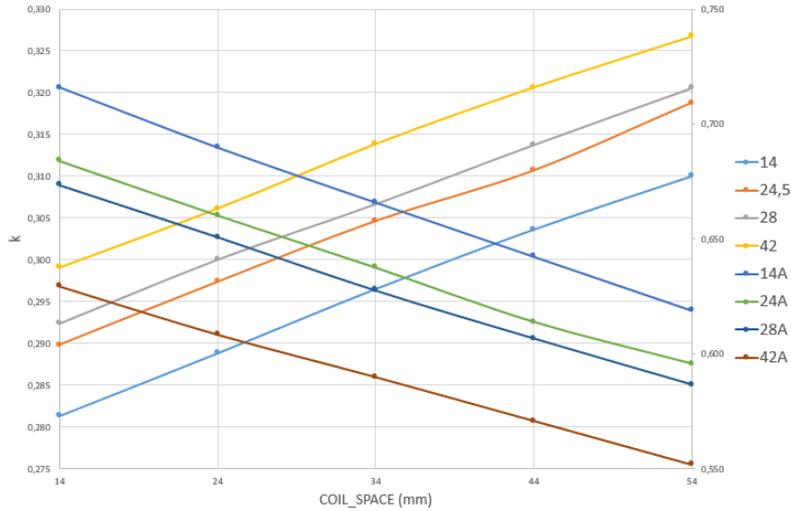


Figura 3.10: Andamento del coefficiente di accoppiamento.

con l'area sull'asse secondario cala allo stesso modo. La scelta è figlia del primo dimensionamento effettuato descritto in precedenza, in quanto per mantenere costante la lunghezza del pad si è deciso di utilizzare una distanza tra le ferriti di 24,5 mm e di 24 mm con l'avvolgimento. Questo rappresenta il miglior compromesso secondo le valutazioni effettuate, ponendosi in una posizione intermedia. Le induttanze ricavate complessivamente al primario e al secondario sono $L_1 = 0,5963 \text{ mH}$ e $L_2 = 0,5971 \text{ mH}$, con una mutua di $M = 0,1778 \text{ mH}$. Il coefficiente di accoppiamento misura 0,298 e la resistenza di ogni singolo avvolgimento è di $27,6 \text{ m}\Omega$. Le dimensioni finali del pad sono 754,2 mm di larghezza, 597,2 mm di lunghezza e 25 mm di altezza, per un'area occupata di $0,450 \text{ m}^2$. Un fatto da evidenziare è la buona approssimazione con la quale si era stimato il flusso all'inizio del procedimento, infatti si assiste ad un aumento di circa il 50% dei valori di autoinduttanza rispetto al caso precedente. La mutua, grazie alla nuova configurazione, aumenta anche di più (circa il 60%). Grazie a questo, l'accoppiamento è aumentato in modo deciso rispetto all'avvolgimento rettangolare pur avendo un pad di dimensioni minori.

Anche in questo caso si vuole fare una valutazione preliminare del campo magnetico che circonda il sistema. Nelle zone laterali si riscontra il valore imposto dalla normativa a distanze superiori, circa un metro e mezzo, rispetto al pad rettangolare. Risulta quindi necessaria una schermatura più importante a parità di prestazioni nel caso si proceda con questa tipologia di avvolgimenti.

3.3.2 Compensazione

Compensazione serie Prima di iniziare l'analisi è necessaria una precisazione: la compensazione viene effettuata a monte di entrambi gli avvolgimenti con un unico banco di condensatori, per sfruttare appieno le semplificazioni offerte dal modello circuitale. Ci si riconduce nuovamente al circuito equivalente a T, per poter introdurre la compensazione serie nel sistema. I parametri ottenuti sono i seguenti:

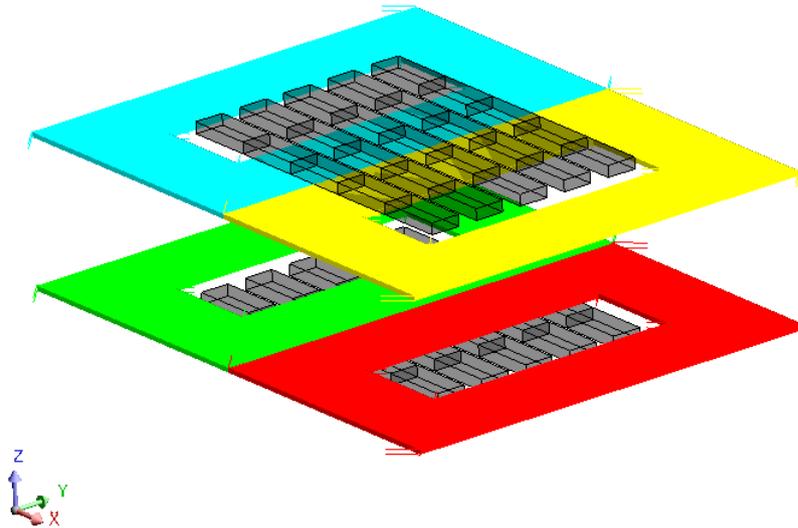


Figura 3.11: Modello prodotto in Flux.

	L [mH]	X_L [Ω]
L_a	0,419	222,391
L_b	0,419	222,810
M	0,178	94,967

Dalla condizione di risonanza, invertendo la formula che la descrive, si possono ricavare facilmente le capacità necessarie per compensare le induttanze L_a ed L_b :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad C = \frac{1}{\omega_0^2 L}$$

Dalle analisi eseguite precedentemente, si andrà a compensare una parte delle due reattanze in serie, che varia tra il 96% e il 100%, valido come termine di paragone ideale. Tuttavia nelle simulazioni effettuate, in prossimità della risonanza perfetta, il software utilizzato non è riuscito a convergere a risultati corretti, in quanto la potenza reattiva che forniva in uscita era di tipo capacitivo. Si è quindi deciso di allentare la mesh nella parte non lineare del sistema, le ferriti, sede del problema, introducendo un errore leggermente superiore al caso precedente ma che rende risolvibile il sistema. Inoltre, si è alzato il limite minimo visti i risultati ottenuti nell'altra tipologia di avvolgimento.

COMP %	X_{L_a} [Ω]	X_{L_b} [Ω]	C_1 [nF]	C_2 [nF]
96	214,57	214,97	8,73	8,71
97,5	217,92	218,33	8,59	8,58
98,5	220,156	220,57	8,50	8,49
100	222,39	222,81	8,42	8,40

In questo caso, si sceglie di utilizzare il condensatore C_1 per entrambi i lati, poiché è leggermente superiore e quindi compensa di meno, ponendoci un margine di sicurezza aggiuntivo. Vista l'esperienza accumulata con il primo pad, si è stabilito che si andrà ad alimentare il sistema con il solo generatore di corrente perché è in grado di garantire una potenza trasmessa maggiore in caso di disallineamenti.

Compensazione	96%	97,5%	98,5%	100%	
Tensione [$CURR$]	1266,38	802,65	524,28	395,54	V
Corrente [$CURR$]	76,00	76,00	76,00	76,00	A
Attiva [$CURR$]	24436	26555	28217	29956	W
Reattiva [$CURR$]	93091	54918	28133	2509	VAR
Apparente [$CURR$]	96245	61001	39846	30061	W
φ [$CURR$]	75,29	64,19	44,91	4,79	°
Tensione [L_1]	17528	17292	17116	16938	V
Tensione [L_2]	14544	15416	16065	16716	V
Tensione [R_L]	352,11	367,24	378,70	390,32	V
Corrente [R_L]	67,79	70,71	72,91	75,15	A
Attiva [R_L]	23870	25966	27611	29332	W
Rendimento	97,68	97,78	97,85	97,92	%

Come ci si attendeva, all'aumentare del grado di compensazione diminuiscono tensione, potenza reattiva e apparente. Aumentano invece la potenza attiva, la tensione indotta al secondario e, di conseguenza, quella sul carico. Si vuole porre l'attenzione sui valori ricavati ai morsetti del carico equivalente: questi risultano ampiamente confrontabili con quelli della bobina rettangolare a conferma della bontà dei valori calcolati inizialmente. I rendimenti, invece, risultano leggermente inferiori, poiché le perdite per effetto Joule sono maggiori a causa della maggior lunghezza dei conduttori. La scelta della compensazione ricade sul 98,5%, poiché riesce a minimizzare il sovradimensionamento necessario, garantendo al contempo una potenza trasmessa di oltre 27 kW.

Compensazione parallelo Per introdurre la compensazione parallelo, è necessario ricondursi al circuito equivalente a II.

	L [mH]	X_L [Ω]
L_a	0,475	253,896
L_b	0,477	254,727
M^*	0,328	172,390

In questo caso, la reattanza M^* non compensata è molto minore al caso precedente, ma essendo posta in serie più gravosa sulla potenza erogata, si considera solo il caso di perfetta compensazione. Ciò conduce a due condensatori di 7,37 e 7,35 nF, di cui si utilizza quello con capacità maggiore per le motivazioni elencate precedentemente. Tuttavia, i risultati ottenuti sono poco incoraggianti, poiché la compensazione così effettuata, unica possibilità per trasferire il carico correttamente al primario, conduce ad uno sfasamento pari a 89,6°. Infatti, a fronte di 35 kW trasmessi, si ha una potenza reattiva di oltre 5 MVAR, che causa a sua volta una tensione applicata al generatore di 73,7 kV. Non è quindi ipotizzabile l'utilizzo di questo genere di compensazione poiché sarebbero necessari dei sovradimensionamenti troppo eccessivi, di due ordini di grandezza superiori. La scelta del collegamento della compensazione ricade quindi su quella serie.

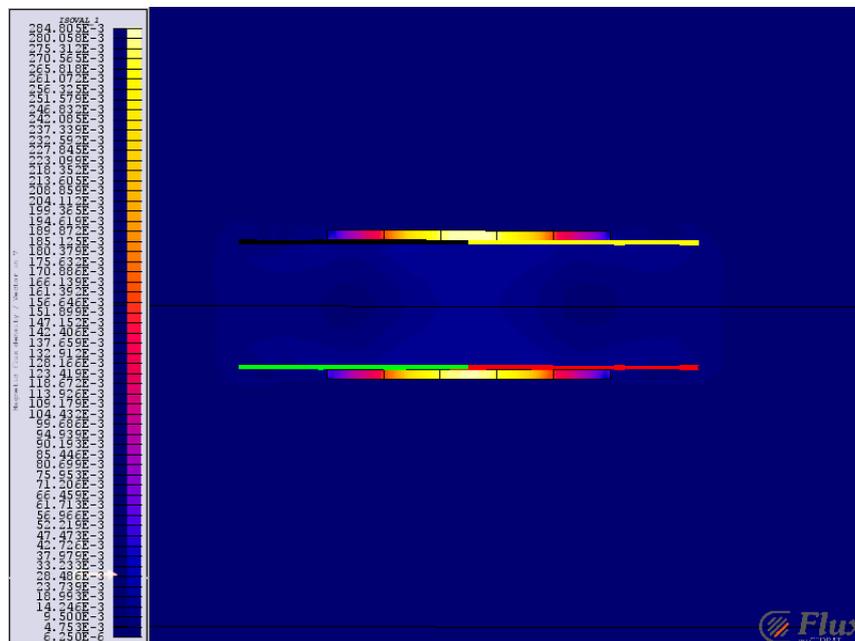


Figura 3.12: Campo magnetico sul piano XZ.

3.3.3 Risposta ai disallineamenti

Si procederà ora con la simulazione delle traslazioni lungo i due assi di movimento, prima trasversale e poi longitudinale, alimentando il circuito con il solo generatore di corrente per i motivi già citati in precedenza. Il comportamento a livello circuitale è uguale al caso di bobina rettangolare: la mutua induttanza diminuisce, diminuendo di conseguenza reattanza sul ramo derivato e aumentando la reattanza su quello principale. Ciò provoca un'ulteriore sotto-compensazione di tutto il sistema aumentando la tensione applicata ai morsetti e la potenza reattiva in gioco.

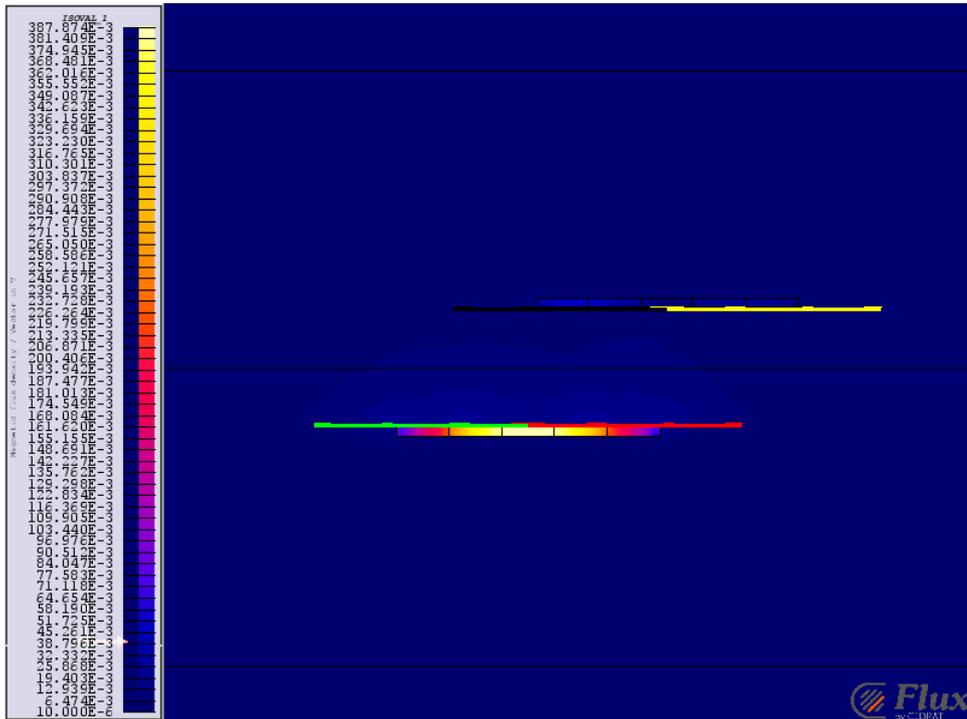


Figura 3.13: Campo magnetico sul piano XZ con disallineamento del 32,5%.

Traslazione trasversale I dati ricavati dalle simulazioni e il passo utilizzato è lo stesso per poter avere risultati facilmente paragonabili tra loro. Quindi si sceglie un passo di 2,5% fino a metà della dimensione e del 5% fino alla sua totalità.

Pos [%]	V [V]	P [W]	Q [VAR]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]	k	η [%]
0	419	29747	11470	388,94	74,88	29125	0,305	97,91
2,5	494	28894	23925	383,27	73,79	28281	0,300	97,88
5	688	27295	44620	372,39	71,70	26699	0,292	97,82
7,5	1054	25109	76068	356,98	68,73	24536	0,280	97,72
10	1610	21888	120422	332,99	64,11	21348	0,261	97,53
12,5	2239	18349	169195	304,45	58,62	17846	0,239	97,26
15	2838	14936	215177	274,13	52,78	14468	0,215	96,87

17,5	3463	11435	262973	239,07	46,03	11004	0,187	96,23
20	3935	8162	298979	200,82	38,66	7764	0,157	95,13
22,5	4360	5260	331303	159,41	30,69	4893	0,125	93,02
25	4630	3152	351880	120,75	23,25	2807	0,095	89,05
27,5	4889	1582	371562	80,68	15,53	1253	0,063	79,22
30	4942	649	375565	41,37	7,97	330	0,032	50,82
32,5	4995	319	379603	4,11	0,79	3	0,003	1,02
35	4889	495	371571	30,35	5,84	177	0,024	35,84
37,5	4727	1065	359228	62,05	11,95	741	0,049	69,63
40	4654	1916	353698	90,70	17,46	1584	0,071	82,66
42,5	4433	2817	336891	113,40	21,83	2476	0,089	87,88
45	4333	3854	329282	134,87	25,97	3502	0,106	90,86
47,5	4196	4626	318898	148,84	28,66	4265	0,117	92,21
50	4098	5313	311428	160,28	30,86	4946	0,126	93,08
55	4017	5934	305271	169,94	32,72	5560	0,133	93,70
60	4068	5615	309118	165,04	31,78	5244	0,129	93,40
65	4220	4756	320722	151,07	29,09	4394	0,118	92,39
70	4398	3671	334252	131,32	25,28	3320	0,103	90,45
75	4481	2643	340535	109,39	21,06	2304	0,086	87,15
80	4649	1801	353290	87,38	16,82	1470	0,068	81,62
85	4674	1218	355205	68,10	13,11	893	0,053	73,32
90	4741	847	360330	52,25	10,06	526	0,041	62,08
95	4791	628	364120	40,11	7,72	310	0,031	49,28
100	4812	505	365681	31,23	6,01	188	0,024	37,17

Lungo l'asse trasversale, per quanto riguarda l'andamento della tensione e della potenza reattiva, si rileva lo stesso andamento crescente presente anche nel caso precedente. Tuttavia, i valori che assumono sono decisamente maggiori, fino a giungere a quasi 380 kVA di potenza apparente e 5 kV di tensione sopportati dall'alimentatore. La cosa che emerge più evidentemente però è l'annullamento della potenza trasmessa a circa un terzo della larghezza del pad, come si vede in figura 3.13. Questo è causato dalla particolare posizione degli avvolgimenti rispetto agli altri, infatti il flusso è concatenato da uno solo di quelli ricevitori, non generando quindi alcuna tensione indotta. Questa tesi è supportata dall'andamento del coefficiente di accoppiamento che segue fedelmente quello della potenza trasmessa e, in pratica, si azzerava in quella determinata posizione, come si può vedere dal grafico in figura 3.14. Per disallineamenti inferiori si verifica un brusco calo della capacità di trasmettere, mentre per quelli superiori si raggiunge un picco 5,5 kW per poi azzerarsi nuovamente con un disallineamento completo. I rendimenti ricavati sono tutti eccellenti nella prima parte precedente ai punti di annullamento, superiori al 95%, dove calano bruscamente, mentre in seguito si attestano su valori del 90% intorno al secondo picco.

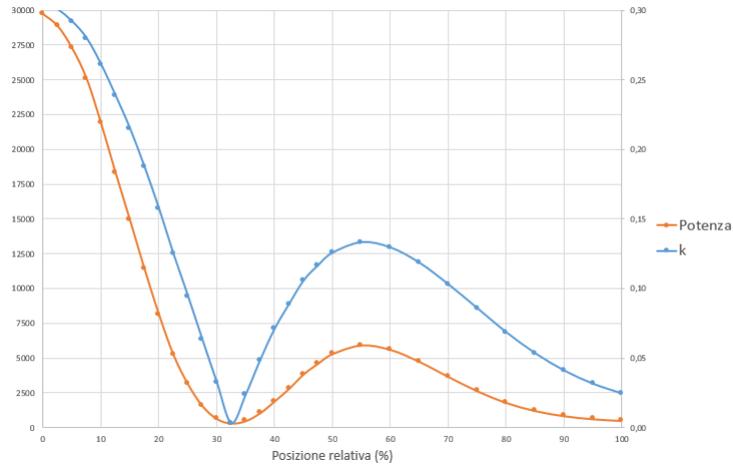


Figura 3.14: Potenza trasmessa e k .

Traslazione longitudinale Si procede ora con le simulazioni lungo l'asse di marcia del veicolo. Rispetto al disallineamento trasversale non dovrebbe esserci il punto di annullamento, poiché in questo senso il flusso viene sempre concatenato. L'andamento dovrebbe risultare quindi più simile a quello del pad rettangolare.

Pos [%]	V [V]	P [W]	Q [VAR]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]	k	η [%]
0	438	28930	16389	383,51	73,84	28317	0,300	97,88
2,5	479	28971	22041	383,78	73,89	28357	0,301	97,88
5	435	29495	15009	387,27	74,56	28876	0,303	97,90
7,5	447	29259	17327	385,70	74,26	28642	0,302	97,89
10	582	28284	33997	379,15	73,00	27677	0,297	97,86
12,5	718	27272	47263	372,23	71,67	26676	0,292	97,81
15	866	26078	60390	363,89	70,06	25494	0,285	97,76
17,5	1040	25109	74962	356,98	68,73	24535	0,280	97,72
20	1253	23744	92188	347,01	66,81	23184	0,272	97,64
22,5	1487	22677	110699	339,02	65,27	22129	0,266	97,58
25	1785	21096	134023	326,82	62,92	20564	0,256	97,48
27,5	2007	19797	151227	316,44	60,92	19279	0,248	97,38
30	2239	18391	169202	304,81	58,68	17888	0,239	97,26
32,5	2524	17021	191049	293,03	56,42	16532	0,230	97,12
35	2740	15475	207694	279,14	53,74	15002	0,219	96,94
37,5	2874	14379	217933	268,86	51,76	13917	0,211	96,79
40	3159	12805	239775	253,36	48,78	12359	0,198	96,52
42,5	3390	11515	257351	239,93	46,19	11083	0,188	96,25
45	3520	10385	267316	227,51	43,80	9965	0,178	95,95
47,5	3762	9047	285740	211,84	40,79	8640	0,166	95,51
50	3855	8111	292876	200,17	38,54	7715	0,157	95,11
55	4180	6053	317617	171,73	33,06	5678	0,135	93,80
60	4346	4557	330251	147,65	28,43	4197	0,116	92,11

65	4503	3214	342219	122,05	23,50	2868	0,096	89,24
70	4633	2278	352097	100,42	19,33	1942	0,079	85,25
75	4681	1608	355741	81,52	15,69	1279	0,064	79,55
80	4769	1155	362451	65,71	12,65	831	0,051	71,94
85	4777	836	363046	51,71	9,96	515	0,041	61,60
90	4861	641	369446	40,87	7,87	322	0,032	50,21
95	4810	515	365563	32,03	6,17	198	0,025	38,35
100	4860	438	369340	25,10	4,83	121	0,020	27,68

Infatti, come si può vedere chiaramente dalla figura 3.15, gli andamenti sia della potenza, che del coefficiente k sono molto più smussati e regolari. È da evidenziare come per un disallineamento minore del 10% addirittura aumenti l'accoppiamento magnetico tra le due bobine per poi calare normalmente. Le altre grandezze riportate in tabella, invece, seguono gli andamenti già descritti in precedenza. I 10 kW trasmessi si ottengono per un disallineamento del 45%, il rendimento resta superiore al 90% fino ad oltre la metà della lunghezza del sistema.

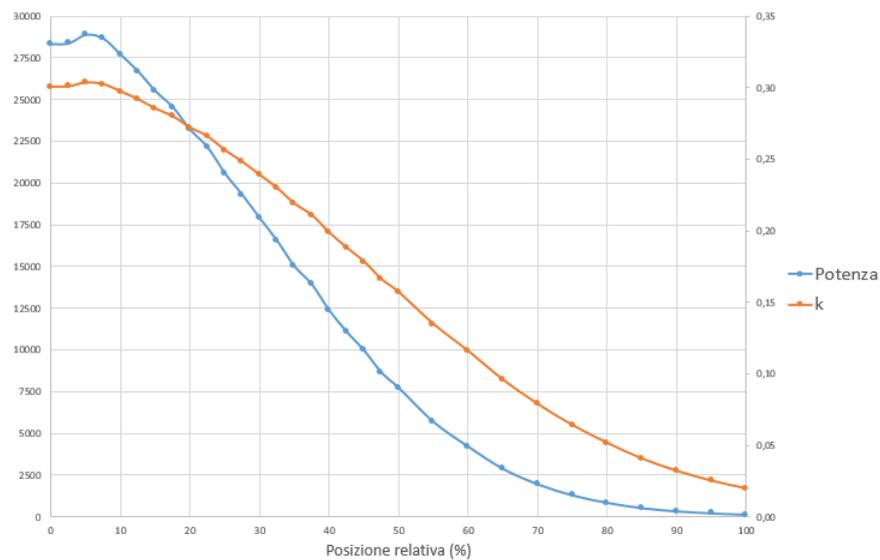


Figura 3.15: Potenza trasmessa e k .

3.4 Confronto tipologie

Ora si analizzeranno in dettaglio tutti gli aspetti geometrici e circuitali di ogni tipologia di avvolgimento, al fine di determinare quale sia il più adatto all'applicazione di alimentazione dinamica di un veicolo elettrico. Innanzitutto si parte con il confronto delle dimensioni dei pad: quello rettangolare risulta leggermente più grande su entrambi gli assi principali, circa 5 cm su entrambi. Tuttavia, nonostante le dimensioni maggiori, è in grado di offrire un coefficiente di accoppiamento di 0,288, leggermente inferiore al 0,298 garantito dalla configurazione a doppia D. Questo grazie alla presenza di una maggiore superficie occupata dagli avvolgimenti che, però, riflette un costo maggiore degli stessi. Questo si propaga anche ai valori di induttanza, che risultano maggiori nel caso del DD pad. Questo consente di utilizzare condensatori di capacità inferiore, di circa un terzo rispetto al pad rettangolare, che hanno un costo inferiore.

L'aspetto principe su cui si basa la scelta però, è la risposta ai disallineamenti, inevitabili, lungo la marcia del veicolo, in termini di accoppiamento magnetico e potenza trasmessa. Senza tralasciare comunque gli aspetti impiantistici che devono essere tenuti in grande considerazione nella modellazione di un sistema. Si procede analizzando le tensioni applicate al generatore e le potenze reattive erogate dallo stesso nelle due varie configurazioni. Si può chiaramente notare come gli andamenti in entrambe le configu-

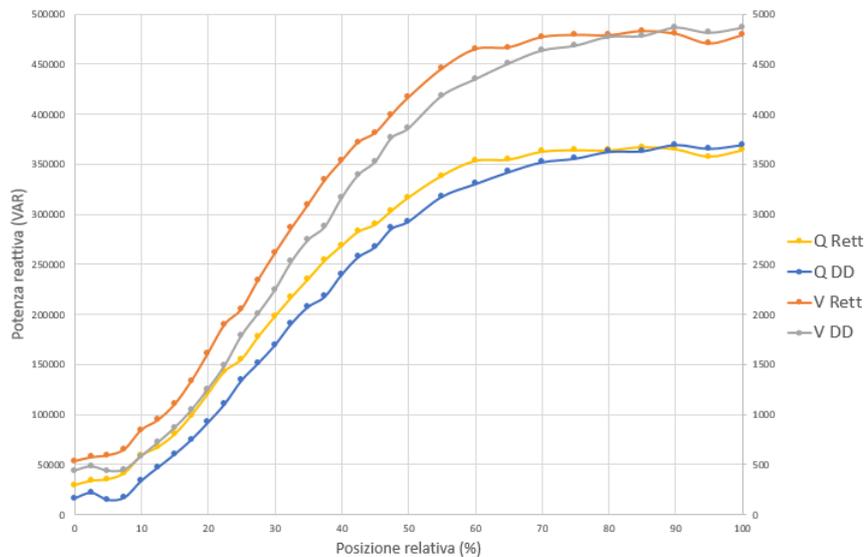


Figura 3.16: Potenza trasmessa e k .

razioni siano concordi tra loro, evidenziando però una minor tensione e potenza reattiva in gioco nel caso del DD pad. Verso il disallineamento totale, invece i valori espressi da questa tipologia risultano maggiori. Tuttavia la zona di interesse applicativo per la tecnologia comprende disallineamenti minori del 75%, che corrisponde ad una distanza tra i pad pari a metà della lunghezza degli stessi. Si passa ora all'analisi delle due grandezze principi del confronto: la potenza trasmessa e l'accoppiamento magnetico. Si evidenzia una sostanziale parità di comportamento dei due pad, a meno di un punto di annullamento all'80% per quello rettangolare che non è presente nella tipologia a

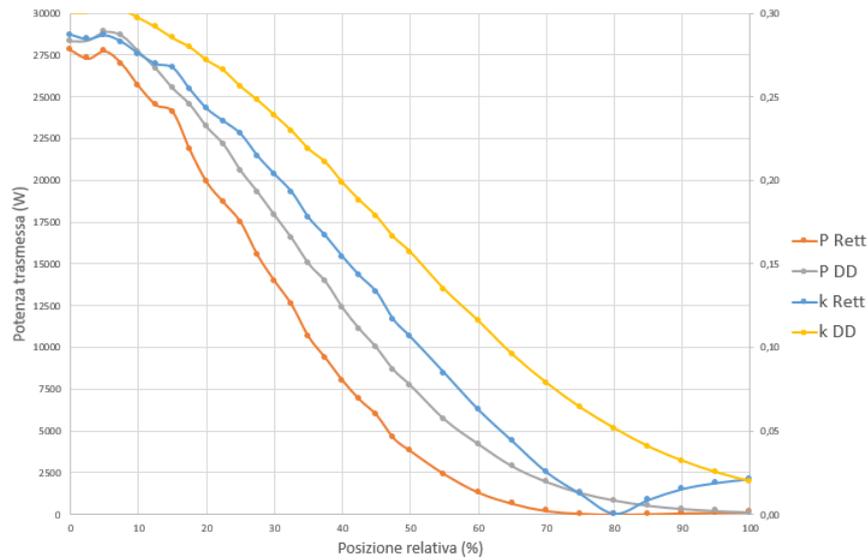


Figura 3.17: Potenza trasmessa e k (asse y).

doppia D. Tuttavia è rilevante notare che i valori per il DD pad sono sempre superiori al modello più semplice. La potenza trasmessa è maggiore di circa 2 kW all’inizio per poi aumentare fino a 5 kW nella zona centrale del grafico, d’interesse maggiore in quanto è l’area di maggior criticità del sistema. Il coefficiente di accoppiamento k , invece, risulta nettamente superiore, garantendo un valore di 0,15 in condizione di nessuna sovrapposizione tra i pad sorgente e ricevitore, dato molto buono se si considera che in perfetto allineamento valori tipici sono dell’ordine di $0,2 \div 0,3$.

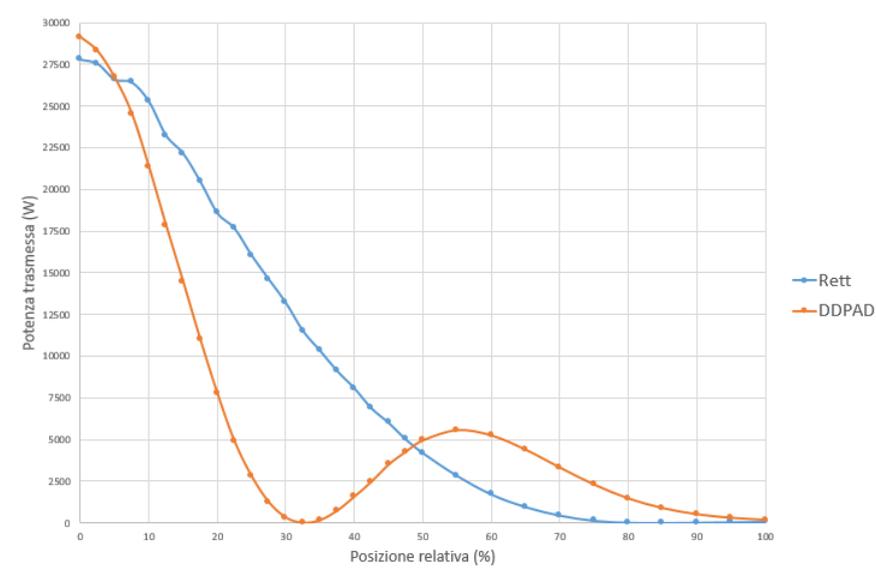


Figura 3.18: Potenza trasmessa e k (asse x).

L’ultimo aspetto da confrontare è la risposta al disallineamento trasversale del veicolo, in cui si presenta infatti l’unica criticità evidenziata dal DD pad. Le grandezze

in gioco riferite al generatore di corrente seguono gli andamenti già presentati finora, con la differenza che in prossimità del punto di annullamento si ottengono i picchi di tensione e potenza reattiva erogati. Il sovradimensionamento necessario non è sostenibile economicamente, visto che si richiederebbe un aumento fino a 380 kVA. Come si vede dal grafico infatti, l'andamento garantito dai due sistemi è molto differente: il pad rettangolare fornisce un andamento continuo senza discontinuità, preferibile in questo contesto. Mentre l'avvolgimento a doppia D presenta potenze trasferibili maggiori a parità di disallineamento, a parte in prossimità di un terzo della larghezza del pad stesso, dove si annullano drasticamente.

La scelta del pad ricade indubbiamente sulla tipologia a doppia D in quanto ha performance nettamente migliori in tutti i campi studiati, eccetto nella traslazione trasversale. Infatti, garantisce minori potenze di dimensionamento, minori tensioni in gioco, sebbene restino comunque elevate, miglior capacità di trasmissione e minori ingombri spaziali. Si accetta quindi un rendimento peggiore, seppur di poco, a causa della maggior quantità di conduttore presente e un comportamento non ottimale nei disallineamenti lungo l'asse trasversale. I quali, tuttavia, grazie ai nuovi dispositivi di mantenimento della carreggiata ad esempio, risultano essere estremamente ridotti o addirittura annullati in ambito autostradale, senza dimenticare che sono allo studio veicoli con una guida completamente automatica.

Capitolo 4

Dimensionamento del sistema globale

Una volta selezionata la tipologia di pad che garantisca maggiormente le caratteristiche richieste da questa applicazione, si vuole procedere con la progettazione del sistema formato da diversi pad sorgenti disposti lungo la carreggiata. In questo capitolo, si analizzerà il funzionamento del sistema per determinare la distanza ottimale tra due pad successivi, il compromesso tra prestazioni e costo. Uno sguardo verrà volto alle caratteristiche degli alimentatori e dell'elettronica di potenza, con la proposta di alcune metodologie di controllo del sistema. Si proseguirà poi con uno dimensionamento di massima di uno schermo per raggiungere gli adeguati livelli di campo magnetico emesso dalla piattaforma e, infine, si stimeranno i costi dell'intero progetto.

4.1 Studio dell'alimentazione dinamica

Innanzitutto è necessario compiere alcune premesse per poter comprendere appieno le scelte effettuate in fase di studio del sistema. Perché il sistema funzioni in modo ottimale e si riesca a trasmettere potenza sufficiente ad alimentare il veicolo adeguatamente, è consigliabile che il profilo di potenza trasmessa sia il più piatto possibile. Chiaramente, questa è una condizione ideale, che non è realizzabile nella realtà a causa della natura stessa della sorgente. Si ricordi infatti che l'alimentazione migliore al primario dal punto di vista della potenza trasmessa è quella di due fili conduttori di lunghezza infinita. L'utilizzo dei pad è, già di per sé, una modellazione di questa soluzione che permette una concreta possibilità di costruzione a costi e con rendimenti ragionevoli. Quindi, il profilo di potenza trasmessa avrà necessariamente delle oscillazioni, è compito del progettista ridurle al minimo e cercare un compromesso tra ottimo tecnico e sostenibilità economica. Prima si era fatto riferimento a 10 kW come termine di paragone tra le varie tipologie, ora però questo valore risulta troppo basso, poiché le fluttuazioni della potenza sarebbero troppo elevate e causerebbero una potenza media trasmessa troppo bassa.

Si cercherà ora di fornire un quadro più preciso riguardo ai valori delle potenze in gioco. Per prima cosa ci poniamo nella molto conservativa ipotesi che il sistema sia lineare e si possa applicare la sovrapposizione degli effetti direttamente alla potenza trasmessa, cosa assolutamente non reale. Infatti, quando si pongono nelle vicinanze

due pad sorgenti, le potenze trasmesse da ognuno vengono influenzate dalla presenza dell'altro che aumenta il flusso concatenato al secondario e, di riflesso, la potenza trasmessa. Questo, tuttavia, permette di fare delle considerazioni numeriche molto semplici che conducono a delle valutazioni molto utili per avere indicazioni sui primi valori da adottare.

Il caso ottimale prevede, quindi, che la potenza media trasmessa nel passaggio da un pad all'altro sia di 30 kW. Questo valore, ponendo come base i valori ricavati dalla traslazione su un singolo apparato lungo l'asse di marcia, è difficilmente ottenibile anche nel caso di due pad adiacenti. Infatti, solo supponendo che la potenza massima trasferita possa aumentare di un terzo fino a 40 kW, quando i pad sono perfettamente allineati, e che, nel massimo disallineamento, ci sia la stessa maggiorazione, 20 kW totali, si otterrebbe una potenza media leggermente superiore. La stima dei valori effettuata è poco realistica in caso di perfetto allineamento, poiché l'effetto principale è quello del pad posto sotto il ricevitore. Mentre nel massimo disallineamento può essere un valore abbastanza realistico, poiché la prossimità di due pad è un elemento decisivo nell'interazione attraverso l'aria. In ogni caso, si definisce come un buon valor medio della potenza $20 \div 25$ kW. Si fissa inoltre, come valore inferiore accettabile 15 kW, ricavato dalla somma delle potenze trasmesse in caso di intervallo nullo tra due sistemi consecutivi. Questo non tenendo conto della prossimità che permette, quindi, di introdurre degli spazi vuoti tra di essi. La prova verrà effettuata ponendo un gap tra i due pad di un quarto la lunghezza di uno, corrispondente quindi a 15 cm: così facendo si risparmia l'utilizzo di un pad ogni 5, riducendo gli apparecchi del 20% rispetto all'ottimo tecnico. Da questa prima analisi, inoltre, si è tralasciato completamente tutto l'aspetto impiantistico e si è scelto di utilizzare un generatore di corrente per ogni sorgente al primario. Per la prova si è studiato lo spostamento tra metà dell'intervallo presente e la mezzeria del pad, per questioni di simmetria. Si sono modellati tre diversi pad sorgente per simulare al meglio l'effetto indotto da quelli laterali quando il ricevitore è sopra a quello centrale.

I risultati ottenuti verranno analizzati partendo dal confronto dei flussi concatenati e dalle grandezze indotte al secondario. Questo poiché ci si prefigge di riuscire a valutare quanto la prossimità di due apparecchi vada ad impattare sulle prestazioni del sistema stesso. Di seguito vengono riportati i valori del flusso sia al primario che al secondario, paragonandoli con il caso di una singola sorgente, e il rapporto tra essi. Con il simbolo della sommatoria, invece, ci si riferisce alla somma dei flussi concatenati in quella particolare posizione nel caso singolo rispetto ad entrambi i pad sorgente interessati, per capire se ci sono eventuali relazioni che è importante sottolineare. Ad esempio, per la posizione al 50% si sommano il flusso concatenato al secondario in quella posizione e quello che si ottiene per un disallineamento pari al 75%, che è quello rispetto alla prima sorgente. Infine, la posizione relativa è definita rispetto al pad centrale.

Pos [%]	SINGOLO		MULTIPAD		$\sum \Phi_R [Wb]$	k
	$\Phi_1 [Wb]$	$\Phi_R [Wb]$	$\Phi_1 [Wb]$	$\Phi_R [Wb]$		
0	3,18E-02	3,05E-02	3,07E-02	3,23E-02		1,062
2,5	3,19E-02	3,05E-02	3,08E-02	3,19E-02		1,046
5	3,17E-02	3,08E-02	3,10E-02	3,20E-02	3,16E-02	1,039
7,5	3,18E-02	3,06E-02	3,10E-02	3,19E-02		1,040
10	3,22E-02	3,01E-02	3,13E-02	3,16E-02		1,048
12,5	3,25E-02	2,96E-02	3,15E-02	3,11E-02		1,052
15	3,28E-02	2,89E-02	3,18E-02	3,06E-02	3,02E-02	1,058
17,5	3,32E-02	2,84E-02	3,23E-02	2,99E-02		1,053
20	3,36E-02	2,76E-02	3,28E-02	2,94E-02		1,068
22,5	3,41E-02	2,69E-02	3,32E-02	2,87E-02		1,066
25	3,47E-02	2,60E-02	3,35E-02	2,84E-02	2,80E-02	1,092
27,5	3,51E-02	2,51E-02	3,41E-02	2,76E-02		1,096
30	3,55E-02	2,42E-02	3,45E-02	2,69E-02	2,68E-02	1,109
32,5	3,61E-02	2,33E-02	3,49E-02	2,62E-02		1,124
35	3,65E-02	2,22E-02	3,54E-02	2,51E-02	2,54E-02	1,132
37,5	3,67E-02	2,14E-02	3,57E-02	2,47E-02		1,158
40	3,73E-02	2,01E-02	3,62E-02	2,40E-02	2,42E-02	1,191
42,5	3,77E-02	1,91E-02	3,64E-02	2,37E-02		1,241
45	3,79E-02	1,81E-02	3,68E-02	2,32E-02	2,33E-02	1,282
47,5	3,84E-02	1,68E-02	3,71E-02	2,27E-02		1,350
50	3,86E-02	1,59E-02	3,73E-02	2,22E-02	2,24E-02	1,399
52,5			3,75E-02	2,20E-02		
55	3,92E-02	1,36E-02	3,78E-02	2,16E-02	2,16E-02	1,584
57,5			3,79E-02	2,16E-02		
60	3,95E-02	1,17E-02	3,82E-02	2,14E-02	2,14E-02	1,824
62,5			3,84E-02	2,14E-02		

Partendo dal flusso concatenato al primario si possono già fare alcune considerazioni. Innanzitutto, i valori ricavati in caso di prossimità tra due pad risultano essere leggermente inferiori a quelli del caso singolo, quando i pad sono ben allineati. Mentre, più ci si allontana da questa condizione, più la differenza tra i valori si assottiglia, per raggiungere l'identità a disallineamenti più marcati, nella mezzieria dell'intervallo. Questo si può giustificare con la maggior corrente indotta al secondario che quindi genera un maggior campo di reazione, causa del minor flusso concatenato al primario. Quindi si può affermare che c'è comunque un'influenza degli apparati adiacenti che ora andremo a quantificare, tanto maggiore quanto è maggiore il disallineamento con quella più vicina. Infatti, analizzando il flusso concatenato al secondario emerge chiaramente che questo è tanto maggiore rispetto al caso singolo, quanto più grande è il disallineamento.

Confrontandoli con la somma dei due casi singoli, si può addirittura affermare che

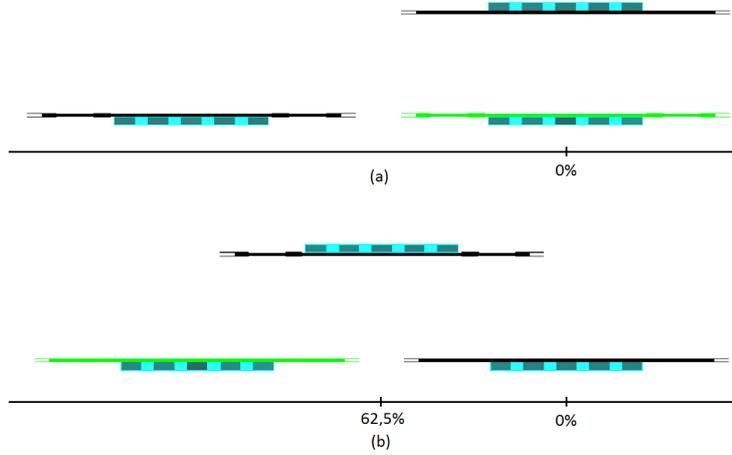


Figura 4.1: Posizioni di riferimento.

coincide con esso per disallineamenti più importanti. Questo poiché, nelle vicinanze dell'allineamento perfetto, c'è l'influenza piccola del pad successivo che comunque concatena una parte del flusso totale. È lecito attendersi dunque che nella mezzeria il flusso concatenato risulti raddoppiato rispetto al caso di traslazione su una singola sorgente e i valori ottenuti poco si discostano da questa previsione. In valori assoluti, tuttavia, il flusso concatenato dal secondario diminuisce di circa un terzo il valore massimo. Ci si aspetta che anche la tensione indotta al secondario segua questo andamento, in quanto si ricava dalla derivata del flusso stesso, che è un'operazione che gode della linearità.

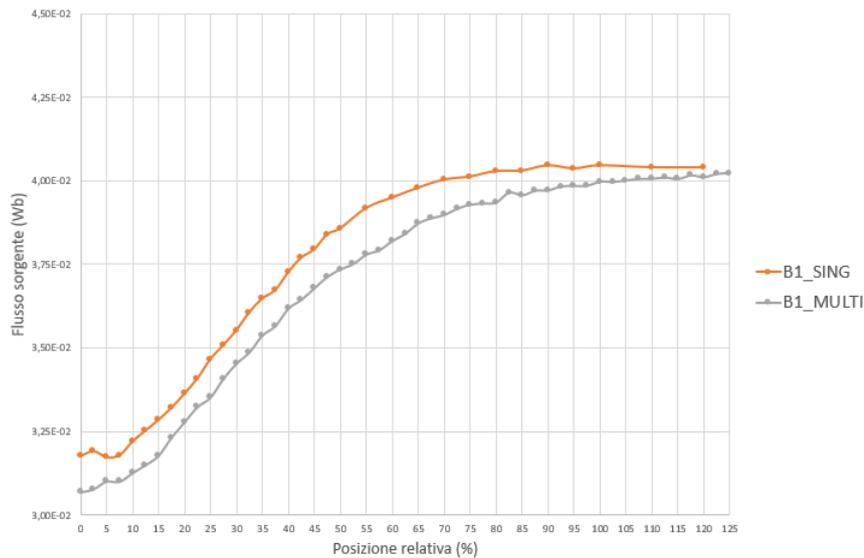


Figura 4.2: Andamento dei flussi al primario.

Passando quindi alle grandezze indotte al secondario, si riscontra l'andamento che ci si era atteso. Infatti, la tensione aumenta dello stesso rapporto del flusso e, di

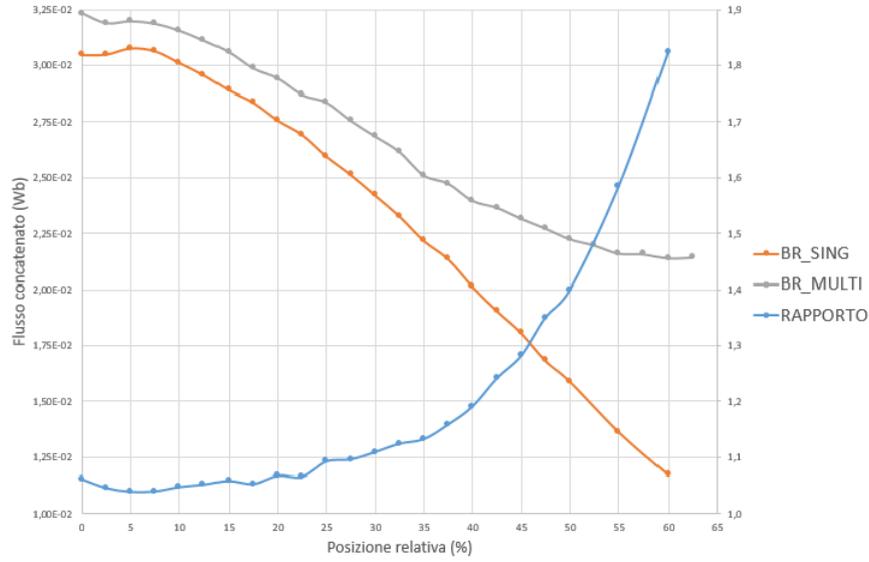


Figura 4.3: Andamento dei flussi al secondario.

conseguenza, anche la corrente indotta. La potenza, dunque, aumenta del quadrato di questo rapporto, che viene sostanzialmente quadruplicata a metà dell'intervallo tra le due sorgenti, rispetto al caso singolo. La potenza massima trasmessa raggiunge perciò i 31,9 kW, maggiore del 6%, nel caso di allineamento perfetto, e i 14 kW, nel caso di massimo disallineamento possibile. La potenza media trasferita risulta quindi di 23,6 kW, valore leggermente inferiore a quello che ci si attendeva da una prima, troppo ottimistica, stima.

Pos [%]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]	k_V	k_P
0	407,11	78,38	31909	383,51	73,84	28317	1,06	1,13
2,5	401,44	77,29	31027	383,78	73,89	28357	1,05	1,09
5	402,52	77,50	31194	387,27	74,56	28876	1,04	1,08
7,5	401,15	77,23	30983	385,70	74,26	28642	1,04	1,08
10	397,24	76,48	30382	379,15	73,00	27677	1,05	1,10
12,5	391,60	75,39	29525	372,23	71,67	26676	1,05	1,11
15	385,17	74,16	28563	363,89	70,06	25494	1,06	1,12
17,5	375,95	72,38	27212	356,98	68,73	24535	1,05	1,11
20	370,47	71,33	26424	347,01	66,81	23184	1,07	1,14
22,5	361,27	69,56	25128	339,02	65,27	22129	1,07	1,14
25	357,04	68,74	24543	326,82	62,92	20564	1,09	1,19
27,5	346,86	66,78	23163	316,44	60,92	19279	1,10	1,20
30	338,11	65,10	22010	304,81	58,68	17888	1,11	1,23
32,5	329,39	63,42	20889	293,03	56,42	16532	1,12	1,26
35	316,06	60,85	19233	279,14	53,74	15002	1,13	1,28
37,5	311,46	59,96	18677	268,86	51,76	13917	1,16	1,34
40	301,71	58,09	17526	253,36	48,78	12359	1,19	1,42

42,5	297,83	57,34	17078	239,93	46,19	11083	1,24	1,54
45	291,61	56,14	16372	227,51	43,80	9965	1,28	1,64
47,5	286,07	55,08	15756	211,84	40,79	8640	1,35	1,82
50	280,05	53,92	15100	200,17	38,54	7715	1,40	1,96
52,5	276,53	53,24	14723					
55	271,93	52,36	14237	171,73	33,06	5678	1,58	2,51
57,5	271,50	52,27	14192					
60	269,25	51,84	13958	147,65	28,43	4197	1,82	3,33
62,5	269,64	51,91	13998					

Dal grafico in figura 4.3 si può chiaramente verificare che la differenza nei due casi si amplia durante la marcia del veicolo, mentre il rapporto subisce un'impennata decisa maggiore è la vicinanza alla mezzieria dell'intervallo.

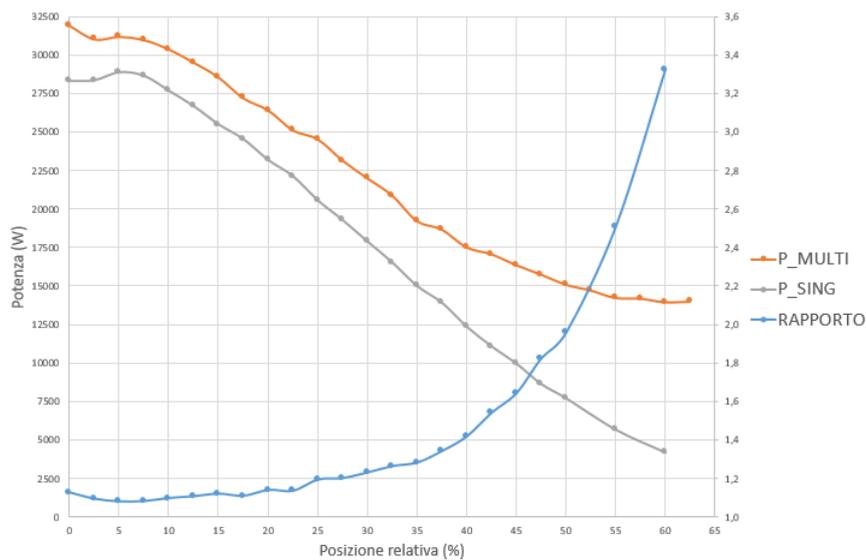


Figura 4.4: Andamento della potenza trasmessa.

Si passa ora ad analizzare gli effetti che questa diversa configurazione ha sulla sorgente in corrente del sistema. A causa del minor flusso concatenato, ci si aspettano delle tensioni e delle potenze reattive minori, con conseguente minor sovradimensionamento e costi del sistema.

Pos [%]	V_M [V]	P_M [W]	Q_M [VAR]	V_S [V]	P_S [W]	Q_S [VAR]
0	549	31519	-27395	438	28930	16389
2,5	508	30627	-23511	479	28971	22041
5	446	30767	-14227	435	29495	15009
7,5	445	30525	-14504	447	29259	17327
10	396	29872	-3937	582	28284	33997
12,5	388	28952	5761	718	27272	47263
15	430	27908	17005	866	26078	60390
17,5	622	26481	39147	1040	25109	74962
20	831	25574	57768	1253	23744	92188
22,5	1053	24155	76257	1487	22677	110699
25	1195	23405	87788	1785	21096	134023
27,5	1484	21861	110636	2007	19797	151227
30	1718	20527	128918	2239	18391	169202
32,5	1896	19187	142783	2524	17021	191049
35	2160	17383	163207	2740	15475	207694
37,5	2310	16508	174767	2874	14379	217933
40	2584	15121	195837	3159	12805	239775
42,5	2724	14306	206558	3390	11515	257351
45	2907	13244	220526	3520	10385	267316
47,5	3088	12235	234377	3762	9047	285740
50	3208	11198	243517	3855	8111	292876
52,5	3293	10353	250045			
55	3443	9415	261468	4180	6053	317617
57,5	3511	8775	266659			
60	3659	7993	277937	4346	4557	330251
62,5	3774	7355	286763			
65	3940	6665	299328	4503	3214	342219
70	4074	5518	309546	4633	2278	352097
75	4237	4597	322011	4681	1608	355741
80	4272	3825	324646	4769	1155	362451
85	4387	3101	333406	4777	836	363046
90	4467	2545	339469	4861	641	369446
95	4538	2180	344846	4810	515	365563
100	4606	1827	350063	4860	438	369340
110	4651	1298	353491	4828	368	366953
120	4677	959	355429	4826	340	366812
125	4741	835	360282			

I risultati ottenuti non seguono l'andamento preventivato in precedenza lungo tutto l'arco di utilizzo previsto. Le considerazioni effettuate vengono soddisfatte per disallineamenti superiori al 20% la lunghezza del pad. In questa zona di funzionamento,

le tensioni e le potenze reattive richieste all'alimentatore sono minori. Questo comporta una decisa riduzione del sovradimensionamento necessario: la potenza apparente passa infatti da 318 a 278 kVA, pari ad una riduzione del 15%. La potenza fornita viene distribuita tra le due sorgenti sulle quali sta scorrendo il ricevitore rispetto alla posizione del pad stesso. La maggior parte di essa proviene da quello coperto maggiormente, mentre nella seconda hanno una quota molto più importante le perdite per effetto Joule rispetto alla potenza trasmessa. I pad successivi a quelli interessati dal ricevitore non vengono invece interessati dalla trasmissione di potenza: devono quindi fornire solo la potenza attiva necessaria a compensare le perdite.

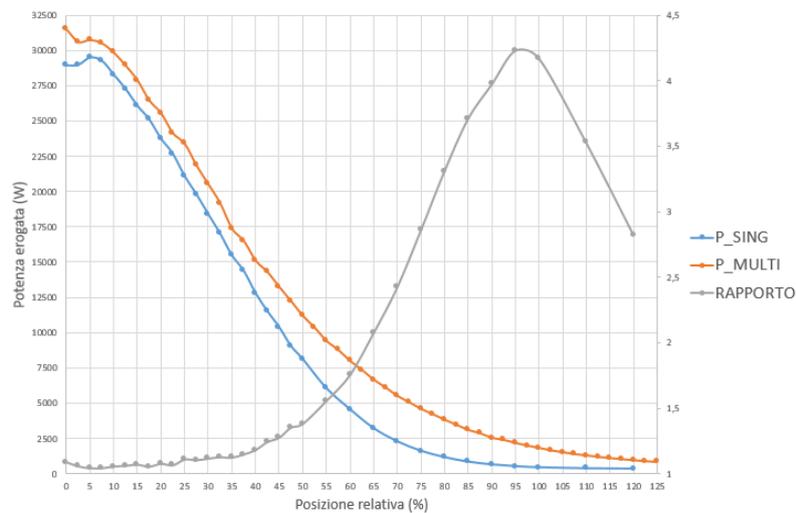


Figura 4.5: Andamento della potenza all'alimentazione.

Nell'intervallo di disallineamenti minori, in prossimità del perfetto allineamento, si assiste ad un comportamento anomalo del sistema. Infatti, la tensione ricomincia a salire fino a 550 V, a causa dall'aumento di potenza reattiva che diventa però di tipo capacitivo. Ciò sta a significare un eccesso di compensazione in queste posizioni, probabilmente dovuta all'aumento della mutua induttanza del sistema. Infatti, in queste condizioni, con il flusso concatenato del sistema che aumenta, si assiste all'aumento della mutua induttanza associata a parità di corrente. Questo causa una diminuzione dei parametri del circuito equivalenti a cui si era applicata la compensazione, facendo risultare il circuito sovracompensato. Contestualmente, il rendimento associato all'alimentazione di tre bobine sorgenti oscilla tra un minimo di 92,5% in corrispondenza della metà dell'intervallo e un massimo di 96,1%, con perfetta sovrapposizione. L'andamento associato è mostrato nel grafico in figura 4.5.

4.1.1 Elettronica di potenza

Si passa ora a valutare le diverse tipologie a disposizione per quanto riguarda l'elettronica di potenza, al fine di garantire il più ampio range di utilizzo possibile del dispositivo, limitando al massimo le perdite. Per le frequenze di utilizzo e le potenze in gioco, è necessario fare affidamento agli IGBT transistor, particolarmente adatti a

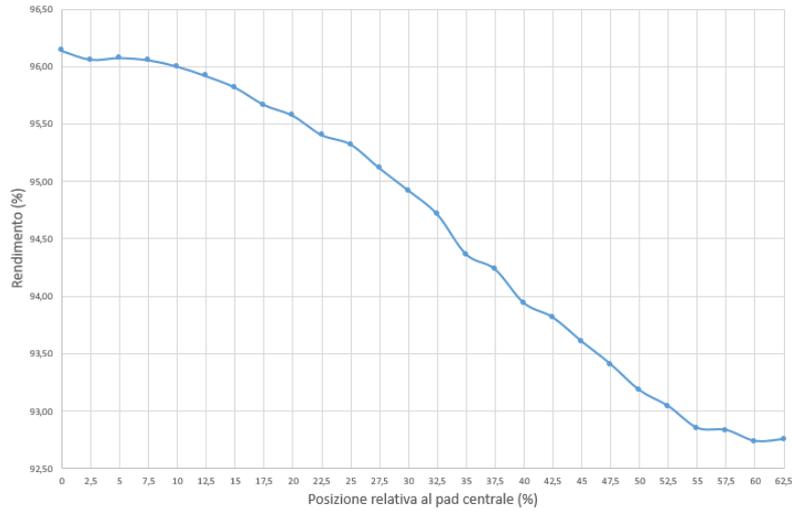


Figura 4.6: Andamento del rendimento totale.

queste condizioni. Inoltre, per questo genere di applicazioni, vista l'elevata frequenza di funzionamento, in genere vengono utilizzati convertitori risonanti soprattutto al primario. Al secondario, invece, ci si può limitare ad un raddrizzamento più semplice, poiché in ogni caso la potenza in ingresso è poi gestita dal sistema di controllo del veicolo che la distribuisce a tutti gli utilizzatori.

In particolare, vista la presenza di potenza capacitiva nel sistema, inizialmente non preventivata, è necessario adottare una tipologia di convertitore che sia in grado di sopportarla. Normalmente, la potenza reattiva erogata dai condensatori genera degli effetti sui convertitori che sporcano la conversione stessa, generando armoniche e interferenze elettromagnetiche. Queste problematiche sono risolvibili utilizzando un inverter a corrente impressa con risonanza di tipo parallelo, generalmente impiegato nel riscaldamento ad induzione. Questa tipologia, infatti, richiede di essere utilizzata con un carico che fornisca potenza reattiva all'inverter a causa della presenza dello stesso.

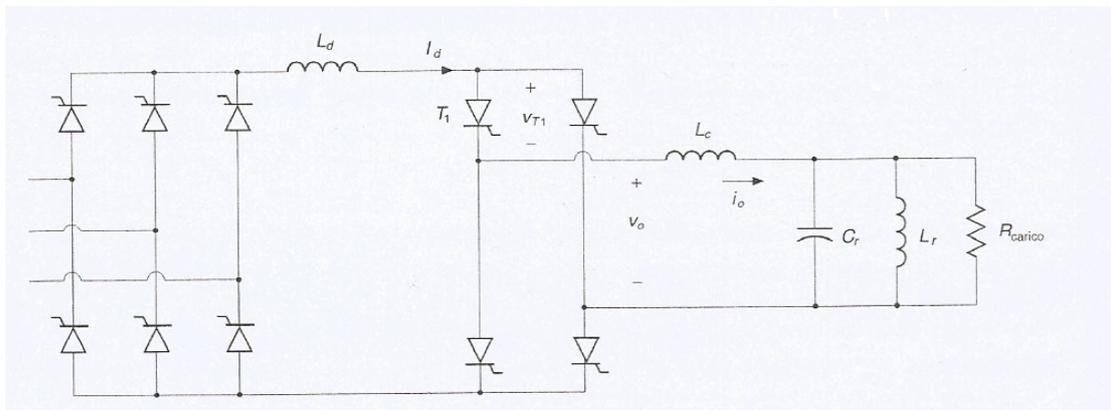


Figura 4.7: Schema del convertitore.

Il primo stadio di conversione dalla rete al sistema è rappresentato da un ponte a tiristori controllati che, posto in serie ad un'induttanza abbastanza grande, fornisce una corrente continua in uscita, I_d . A questo punto, la corrente viene nuovamente alternata alla frequenza desiderata con un altro ponte a tiristori monofase. Quindi si passa alla posizione in risonanza vera e propria, ponendo un condensatore C_r in parallelo al circuito illustrato in precedenza, qui rappresentato da L_r e R . Questa risonanza deve essere quindi progettata su frequenze inferiori a 85 kHz, che è la pulsazione del generatore di corrente, in modo da ritardare la tensione rispetto alla corrente. Prima di questo però, viene inserita una piccola induttanza al fine di limitare gli alti gradienti di corrente durante la commutazione che va ad impattare sulla forma d'onda, facendola diventare trapezoidale. L'andamento della tensione sul tiristore, figura 4.7, mostra

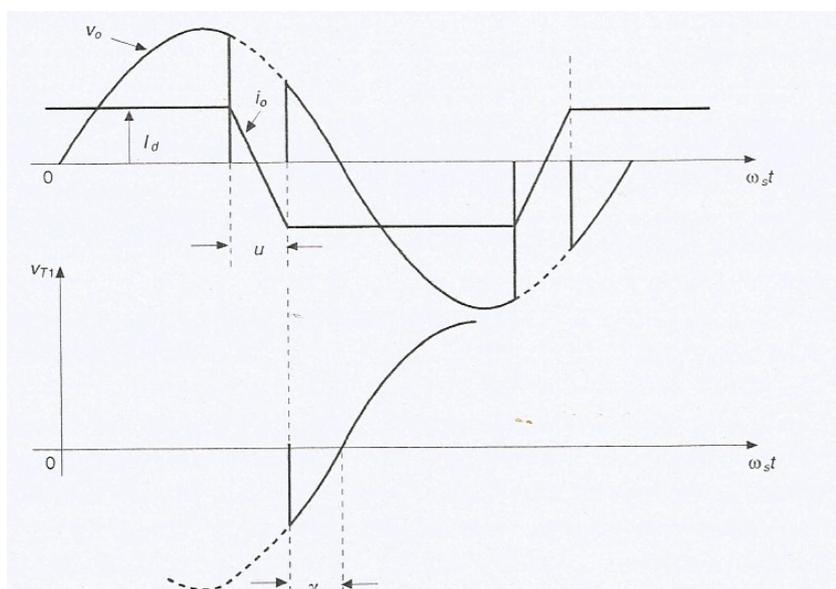


Figura 4.8: Andamento tensione.

che, dopo che ha smesso di condurre, una tensione inversa compare su di esso per un breve intervallo di tempo. Quindi si richiede al componente di sostenere questo picco negativo, avendo un tempo di spegnimento tipico abbastanza grande, oltre a bloccare la tensione di polarizzazione diretta.

Il controllo di questa tipologia si può effettuare variando la frequenza di alimentazione o la corrente sul tratto in continua, tramite il ponte a tiristori o un convertitore dc-dc, tipicamente un classe E. Tuttavia in questa applicazione, il controllo non è necessario in quanto la tipologia di veicolo è fissata e, quindi, anche la potenza richiesta. Inoltre è necessario, per l'avviamento delle oscillazioni, che il carico sia già in risonanza e questo si ottiene tramite un condensatore precaricato che riversa la sua carica nel circuito risonante instaurando l'andamento desiderato. Il rendimento di questa tecnologia si assesta su valori compresi tra 90 ÷ 95%.

Quindi si decide di utilizzare al secondario un raddrizzatore a diodi a ponte intero non controllato, vista la presenza di tutto il sistema di gestione della potenza. Al

primario invece, la scelta ricade sulla tipologia appena descritta che permette di gestire senza problemi la potenza reattiva in gioco, con l'aggiunta di piccoli accorgimenti.

4.1.2 Configurazione finale

La scelta dell'elettronica di potenza con cui interfacciarsi con la rete permette anche l'utilizzo della compensazione totale del sistema, in modo da diminuire drasticamente sia la potenza reattiva in gioco e, contestualmente, anche le dimensioni della capacità C_r . Si procederà, quindi, con la verifica delle considerazioni appena effettuate, per stabilire la configurazione finale del sistema. Dal punto di vista circuitale accade quanto riassunto in tabella:

Pos [%]	V_S [V]	P_S [W]	Q_S [VAR]	V_{RL} [V]	I_{RL} [A]	P_{RL} [W]
0	1540	38618	-110524	450,92	86,82	39147
2,5	1472	38550	-105037	450,63	86,76	39096
5	1353	37248	-95863	443,04	85,30	37791
7,5	1195	36250	-83300	437,36	84,21	36828
10	1119	35272	-77349	431,99	83,17	35928
12,5	963	34436	-64559	427,40	82,29	35169
15	787	33428	-49598	421,74	81,20	34245
17,5	603	32110	-32659	414,27	79,76	33041
20	470	30447	-18621	404,48	77,87	31498
22,5	388	28957	5577	395,81	76,21	30163
25	506	27266	27138	385,62	74,24	28629
27,5	725	25478	48859	374,61	72,12	27018
30	955	23993	68473	365,79	70,43	25762
32,5	1192	22334	87793	355,55	68,45	24339
35	1429	21053	106568	348,04	67,01	23322
37,5	1716	19223	128966	336,30	64,75	21774
40	1912	17960	144212	329,44	63,43	20896
42,5	2139	16446	161728	319,70	61,55	19678
45	2308	15164	174784	312,37	60,14	18786
47,5	2488	13852	188589	304,79	58,68	17885
50	2626	12782	199186	299,82	57,72	17307
52,5	2801	11896	212537	297,17	57,21	17002
55	2936	11116	222881	296,12	57,01	16882
57,5	3036	9814	230523	287,74	55,40	15941
60	3222	9127	244729	288,59	55,56	16035
62,5	3321	8325	252282	287,58	55,37	15923
65	3503	7616	266083	288,59	55,56	16035
67,5	3564	6831	270765	287,74	55,40	15941
70	3626	6475	275485	296,12	57,01	16882
72,5	3674	5810	279164	297,17	57,21	17002
75	3775	5228	286863	299,82	57,72	17307

77,5	3811	4738	289616	304,79	58,68	17885
80	3912	4326	297264	312,37	60,14	18786
82,5	3956	3938	300598	319,70	61,55	19678
85	3983	3641	302672	329,44	63,43	20896
87,5	4037	3260	306781	336,30	64,75	21774
90	4038	2979	306864	348,04	67,01	23322
92,5	4112	2713	312531	355,55	68,45	24339
95	4184	2476	317993	365,79	70,43	25762
97,5	4148	2244	315205	374,61	72,12	27018
100	4130	2066	313900	385,62	74,24	28629
102,5	4173	1898	317141	395,81	76,21	30163
105	4266	1736	324176	404,48	77,87	31498
107,5	4259	1603	323644	414,27	79,76	33041
110	4264	1477	324029	421,74	81,20	34245
112,5	4223	1359	320950	427,40	82,29	35169
115	4227	1256	321226	431,99	83,17	35928
117,5	4290	1147	326047	437,36	84,21	36828
120	4299	1070	326703	443,04	85,30	37791
122,5	4325	1022	328718	450,63	86,76	39096
125	4277	939	325017	450,92	86,82	39147

Aumentare il grado di compensazione porta in dote diversi e sostanziali benefici a livello progettuale al sistema. Innanzitutto, abbassa le tensioni massime che l'alimentatore deve essere in grado di sostenere dai 4700 V ai 4300 V del secondo caso. Di riflesso, anche la potenza reattiva in gioco diminuisce di ben 40 kVAR, infatti la potenza che assorbe il sistema nel caso peggiore è di 325 kVAR. Questo rende comunque necessaria l'introduzione di una capacità che compensi la quota di potenza induttiva rimanente. Dal punto di vista del carico, il flusso concatenato aumenta in tutte le diverse posizioni e permette di innalzare i livelli di tensione e corrente prima non raggiungibili. La corrente massima aumenta fino a 87 A, un valore sostenibile dai conduttori, in quanto la densità di corrente rimane comunque inferiore ai 5 A/mm², che rappresenta un valore di soglia. La tensione aumenta anch'essa fino a 450 V per una potenza massima trasmessa al carico di 39 kW, pari al 22%. La potenza minima in condizioni di massimo disallineamento risulta essere di 16 kW, in aumento del 15% rispetto al caso precedente. La potenza media trasmessa è quindi di 28,3 kW, quindi 5 kW in più ottenuti rispetto alla compensazione inferiore. L'ultimo aspetto da evidenziare è lo spostamento del punto in cui il sistema diventa sovracompensato: questo, come preventivabile, si allontana dalla condizione di massimo allineamento di quasi un quarto la lunghezza del pad. La potenza media reattiva in gioco è di 188 kVAR assorbiti dal sistema, a fronte dei 234 kVAR del caso precedente, si ottiene quindi una grossa diminuzione della necessità di compensare e sovradimensionare gli apparati. Per ridurre ulteriormente questo aspetto sono state studiate delle soluzioni che permettono la modulazione della capacità per

mantenere le condizioni di risonanza del sistema, in particolare C_r viene sostituito dal sistema illustrato qui in figura 4.8.

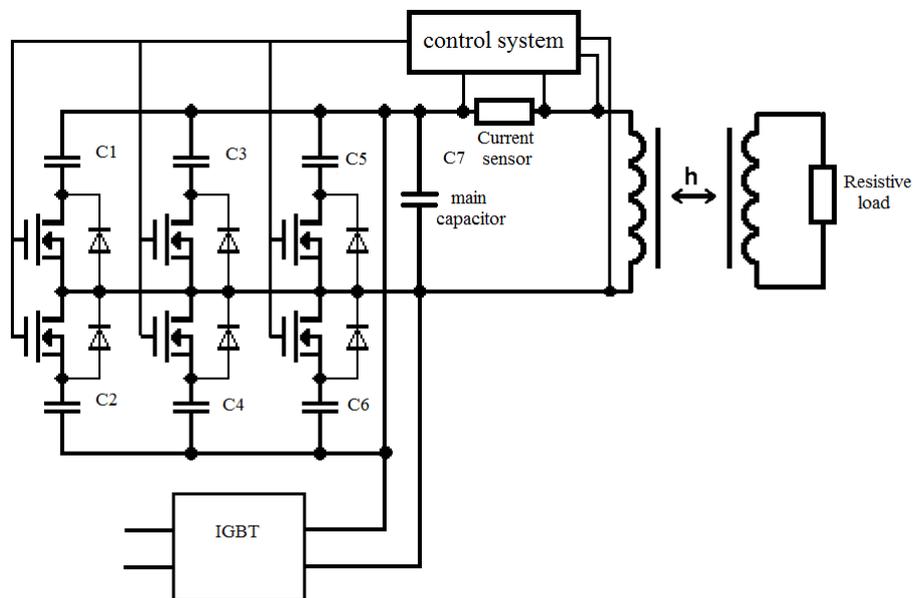


Figura 4.9: Schema compensazione variabile.

Il sistema consiste nell'aggiungere una serie di capacità di diverse dimensioni e connesse tra loro in serie e parallelo, in modo da offrire una vasta gamma di combinazioni possibili. Queste vengono azionate tramite degli switch, controllati tramite un sistema di controllo, con dei diodi in parallelo, in modo da ridurre il numero di interruttori necessario. Il sistema di controllo si basa sulla misurazione della frequenza: quando questa inevitabilmente varierà, si aziona il meccanismo a feedback che aziona gli interruttori in modo da riportare la frequenza al valore nominale. Questo avviene quando la tensione sulle capacità è al massimo, in modo da azzerare gli sbalzi di corrente nel circuito e permettere una velocità elevata di reazione del sistema. Inoltre, contemporaneamente si permette al circuito di commutare anche se sono presenti correnti fino a 100 A. Questo sistema di affinamento della capacità, permette di lavorare sempre nelle condizioni di risonanza anche in presenza di disallineamenti e di variazioni dell'altezza da terra del veicolo, non sovraccaricando così l'elettronica di potenza del sistema. Dalla scelta delle capacità da disporre, deriva il grado di accuratezza con il quale sintonizzare il sistema: si possono facilmente raggiungere il centinaio di Hertz come ordine di grandezza.

Dall'analisi della figura 4.9 emergono chiaramente le differenze di prestazioni rilevate nelle due diverse configurazioni. Si può apprezzare inoltre la quota di potenza fornita da una delle sorgenti sul totale di quella trasmessa dal sistema. In prossimità del perfetto allineamento, la sorgente in questione trasferisce quasi totalmente la potenza erogata al secondario. Mentre, mano a mano che ci si allontana la proporzione cambia fino a giungere ad un punto di parità a metà della distanza tra i due primari successivi. Da questo punto in poi, il primo pad non è in grado di fornire molta potenza

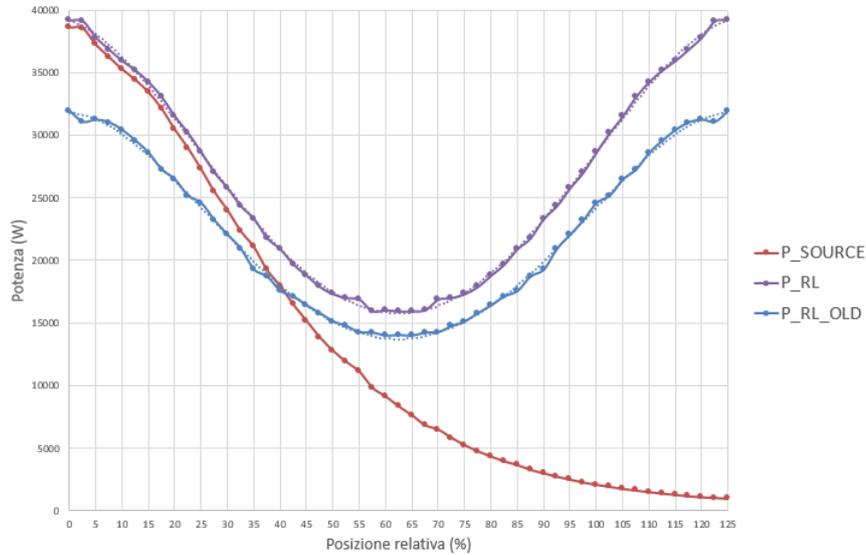


Figura 4.10: Forme d'onda in uscita.

al secondario, ma la sua presenza fa in modo, creando comunque un flusso, che quello vicino sia in grado di trasferire molta più potenza rispetto al singolo apparato. Per quanto riguarda i rendimenti, i valori sono leggermente superiori e del tutto confrontabili con il caso precedente, le differenze più marcate si notano nel caso di massimo disallineamento. Infatti, con la compensazione maggiore, si diminuisce la quota delle perdite in proporzione alla potenza trasmessa e si passa dal 92% al 93%, mentre nelle altre condizioni, l'aumento delle perdite Joule compensa maggiormente l'aumento di potenza trasmessa. Comunque il rendimento cresce mediamente di quasi mezzo punto percentuale lungo tutto il tratto simulato.

Quindi il sistema progettato è in grado di garantire rendimenti molto elevati tra i due avvolgimenti, trasferendo una potenza media di 28,3 kW. Questa potenza risulta essere molto vicina a quella che si era prefissata e consente di ricaricare le batterie del veicolo quando la richiesta del motore lo consente. Con i dati a disposizione si ottengono infatti queste energie trasferite tra le due mezzerie degli intervalli tra due sorgenti consecutive:

Vel [km/h]	t [ms]	E [J]
36	37,3	1056
54	24,9	705
72	18,7	529

L'energia trasferita al veicolo, come si nota, è inversamente proporzionale alla velocità dello stesso. Supponendo quindi di alimentare un tratto di 100 m, sono necessari 134 pad di questa tipologia in grado di trasferire complessivamente al veicolo 71 kJ, se percorso alla velocità di 72 km/h (scenario extraurbano), e di 142 kJ ai 36 km/h (scenario urbano). A prescindere dalle valutazioni energetiche, si può affermare che, se il veicolo marcia sfruttando sempre i 30 kW di potenza disponibili al motore, alimentandolo con

questo sistema si riesce a garantire una maggiore autonomia. Infatti, per percorrere la stessa distanza sarà necessario scaricare le batterie solo del 5% rispetto ad un veicolo non alimentato, aumentando di venti volte il range di utilizzo in queste condizioni.

4.1.3 Impianto

Si vuole ora analizzare l'aspetto impiantistico per un'implementazione nella sede stradale del sistema. A questo punto è necessario affiancare al sistema una logica di controllo dello stesso, che possa ottimizzare le prestazioni e rendere più sicuro il sistema.

La prima soluzione esplorata consiste nell'affidare il controllo del sistema alle grandezze del circuito, quindi utilizzando una metodologia passiva. Infatti, connettendo in parallelo i tre apparati sorgente e alimentando il sistema con il doppio della corrente, 152 A, potrebbe essere possibile che la corrente si distribuisca autonomamente nelle due bobine interessate ed interessare solo marginalmente la terza, vista più simile ad un circuito aperto, visto che la mutua induttanza è nulla. Si è effettuata una simulazione esplorativa con il ricevitore posizionato a metà tra le due sorgenti, tuttavia i risultati ottenuti non rispecchiano le aspettative in modo completo. Infatti, tentare di controllare il sistema in modo passivo dal punto di vista circuitale non risulta conveniente poiché la terza bobina, quella non interessata dall'accoppiamento, è percorsa ugualmente da 40 A di corrente e le altre due si suddividono la restante quota in parti coincidenti. Questo fa sì che i flussi creati nelle prime due bobine non siano sufficientemente intensi da garantire le stesse prestazioni dell'alimentazione singola per ogni pad, si riescono a trasferire infatti solo 9,8 kW a fronte dei 14 precedenti. Questo comportamento suggerisce, inoltre, che anche nel caso di perfetto allineamento la corrente che percorrerà la bobina interessata non sarà di 76 A, come auspicato, ma inferiore diminuendo la capacità di trasferire potenza del sistema. Dal punto di vista della tensione massima applicata al generatore, assume valori inferiori a quelli ottenuti in precedenza di circa metà, circa 2500 V. La potenza reattiva, invece, raggiunge i 400 kVAR nel massimo disallineamento. Questo vantaggio però non è sufficiente a bilanciare la minor capacità di trasmissione del sistema, tale da non venir considerato per una sua implementazione. Oltre al fatto che non sono state considerate le cadute di tensione lungo i collegamenti e che in uno scenario di traffico, bisognerebbe fornire molta più corrente e potenza che si distribuirebbero in modo difficilmente prevedibile lungo il circuito e i veicoli interessati.

L'aggiunta di un sistema di controllo attivo di ogni singolo pad con un unico alimentatore renderebbe molto più complicato ed allo stesso tempo efficiente l'intero sistema, con l'aggiunta di una logica di controllo che supervisioni l'apparato, note le grandezze in gioco, oltre a posizione e velocità del veicolo. Questo si otterrebbe dotando ogni singola sorgente di un interruttore che, su comando della logica, attiva e spegne il pad. In ogni caso, si alimentano contemporaneamente sempre i due pad interessati dall'apparato ricevitore. Anche se, pure rendendo possibile l'alimentazione di più veicoli, si introducono ulteriori perdite negli interruttori che dovrebbero essere dimensionati per supportare un'elevata tensione quando sono chiusi. Non considerando, inoltre, le perdite sui collegamenti e l'ulteriore sfasamento che si andrebbe ad introdurre nel sistema, rendendo necessaria una maggior compensazione. Tuttavia, questo aspetto esula da questo lavoro e non si proseguirà su questa strada, nella quale tanto lavoro deve esse-

re ancora fatto, specialmente in uno scenario di traffico. La soluzione qui adottata è quella di alimentare ogni singolo apparato sorgente con un generatore dedicato che si accenda e spenga quando il veicolo si trova sopra al pad precedente e successivo. In questo modo sono accese solamente le due sorgenti che concatenano il flusso con il ricevitore, limitando gli sprechi di energia. Per implementare questo sistema è necessario conoscere la velocità del veicolo, che in una corsia dedicata in autostrada, ad esempio, si potrebbe limitare e mantenere con i sistemi di *cruise control*, ormai di serie su tanti veicoli. Così facendo, si rende inutile l'utilizzo di transponder e la logica di controllo sarebbe basata su semplici timer, scrupolosamente sincronizzati tra loro.

Addirittura, in uno scenario di traffico si può pensare di attivare in un tratto di 20 m, che si percorre in un secondo ai 72 km/h, le sorgenti mediante un sensore e lasciarle accese. Infatti, il tempo necessario al passaggio del veicolo è dell'ordine di qualche milisecondo e, con tanti veicoli, non sarebbe possibile continuare ad accendere e spegnere i dispositivi. In questo caso però, si rende necessaria un'ulteriore compensazione per rifasare i carichi oppure, in un'ottica di smart grid, si può utilizzare la potenza capacitiva generata per rifasare la rete. In ogni caso, in questa sede, ci si limita a questa trattazione piuttosto qualitativa delle problematiche di interfacciamento con la rete di questo sistema.

4.2 Progetto dello schermo

Per completare la parte tecnica del lavoro è necessario assicurarsi che il sistema rispetti le norme sulle emissioni elettromagnetiche. Si rende quindi necessario il dimensionamento di uno schermo al fine di controllare il campo magnetico prodotto. Innanzitutto si è deciso di utilizzare alluminio come materiale schermo a forma di U, grazie alle sue proprietà di schermatura e leggerezza. Si è proseguito individuando come prima variabile del sistema lo spessore dello schermo: dall'esperienza accumulata in questo settore si può definire uno spessore minimo di 1 mm e un massimo di 5 per trovare un buon compromesso tra peso e costo. Si è verificato, in questa sede, l'impatto che hanno sul sistema gli spessori di 2 e 4 mm. Si sono fissate contestualmente le dimensioni esterne dello schermo per una larghezza totale di 800 mm e una lunghezza di 650 mm. Le due paratie laterali sporgono oltre gli avvolgimenti di 3 cm, che è una quantità fissata, mentre la parte opposta si è fatta variare per misure complessive tra 8, 10 e 12 cm, per non dover scavare troppo in profondità nel terreno e utilizzare troppo spazio nel vano carico del veicolo. Per le prime valutazioni si utilizzerà la prima profondità dello schermo elencata.

Si sono eseguite le simulazioni per entrambi gli spessori presi in esame e si è focalizzata l'attenzione sulla potenza dissipata sullo schermo e sulla distanza del campo magnetico indotto. Come valore soglia si utilizza $27 \mu\text{T}$, che è il valore imposto dalla normativa ICNIRP emanata nel 2010, la quale tuttavia deve essere ancora recepita in alcuni Paesi. Per simulare lo schermo si è utilizzata l'ipotesi secondo cui il campo venga assorbito tutto dalle superfici dello schermo stesso, rappresentato da una impedenza superficiale. Questo è possibile poiché il software calcola autonomamente lo spessore di penetrazione e modella il problema di conseguenza.

Come si può vedere dalle figure, la distanza laterale alla quale si raggiunge il valore è simile in entrambi i casi, cioè circa 1 m. Quindi da questo punto di vista è sostanzialmente uguale la scelta dello spessore. Perciò bisogna ricercare altri fattori che possano far propendere per l'utilizzo di uno rispetto all'altro: si farà riferimento quindi alla potenza dissipata sugli schermi e alla densità di corrente indotta su di essi. In questi aspetti, si palesano pesanti differenze, riscontrando nel caso di 4 mm una potenza dissipata e una densità di corrente di molto inferiori, praticamente dimezzati, rispetto al caso di 2 mm. Quindi si opta per lo spessore maggiore, che offre un rendimento migliore oltre al contenimento del campo magnetico desiderato.

Si procede dunque con l'analisi della profondità dello schermo: bisogna valutare come il campo si modifichi all'esterno e come cambi la distribuzione di corrente nello schermo stesso. Si distinguono di seguito i tre casi proposti in precedenza.

80 mm In questa prima configurazione la vicinanza tra lo schermo e gli avvolgimenti è tale da influenzare pesantemente l'intero sistema. Il campo prodotto ha una forma prevalentemente circolare attorno al dispositivo, con una distanza dai lati inferiore di poco al metro. I valori superiori ad 1 mT sono contenuti dallo schermo. Per quanto riguarda la distribuzione di densità di corrente, questa è sostanzialmente concentrata nelle prossimità dell'avvolgimento, raggiungendo valori di $84,5 \text{ A/m}^2$ sotto alla zona centrale del conduttore, oltre alle paratie laterali. Questo è un aspetto positivo poiché interessa la superficie più estesa dello schermo ed è quindi oggetto di maggior dissipazione del calore. Le perdite generate sono pari a circa 550 W per apparato, per un totale di 1,1 kW.

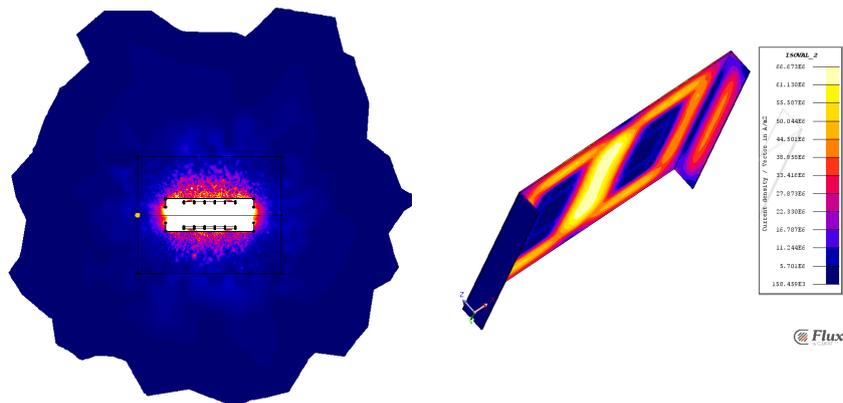


Figura 4.11: Campo e densità di corrente sullo schermo.

Oltre alle grandezze sullo schermo è necessario valutare l'impatto che lo stesso ha sull'alimentazione del sistema. Anche per quanto riguarda questo aspetto, la vicinanza provoca effetti molto marcati: aumentano, infatti, sia la tensione che la potenza reattiva in gioco a causa dell'aggiunta di un'induttanza al circuito. Si presenta quindi, la stessa situazione che si è riscontrata nei casi di sottocompensazione del sistema, anche se in misure meno importanti. La potenza reattiva sale a 15 kVAR e la tensione a 520 V, a

fronte di una potenza trasmessa sostanzialmente identica. Il rendimento del sistema, come previsto, cala al 94,85% con una quota di perdite percentuali pari al 3,41%.

100 mm In questo caso si rilevano sostanziali differenze rispetto al precedente. Innanzitutto il profilo del campo risulta più schiacciato sull'asse z e tende ad allargarsi su quello x, si raggiunge il limite normativo ad una distanza di 1 m, paragonabile al caso precedente. Per quanto riguarda la distribuzione della densità di corrente invece, a causa della diversa conformazione del campo, la superficie sottostante la bobina è interessata solo marginalmente dalle correnti parassite. Mentre, le paratie laterali risultano sollecitate maggiormente soprattutto lungo le estremità. Qui, infatti, si concentra la maggior parte del flusso che sviluppa il picco di densità pari a $78,23 \text{ A/m}^2$. Le perdite indotte nello schermo sono di conseguenza inferiori e pari a 450 W in totale, equamente divise nei due apparati.

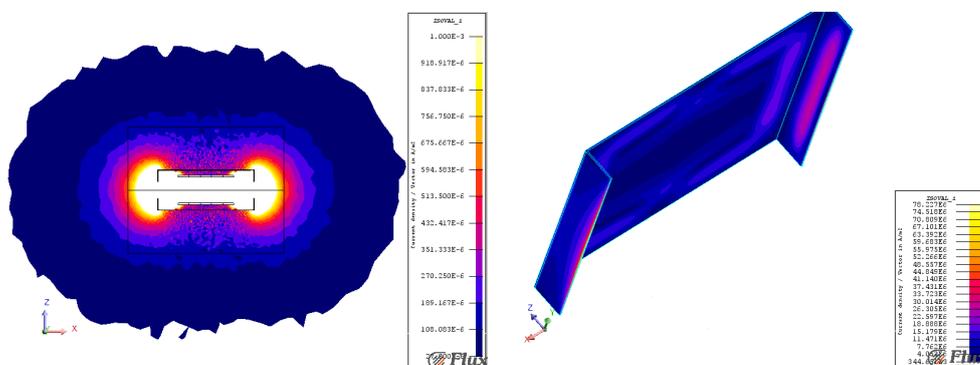


Figura 4.12: Campo e densità di corrente sullo schermo.

Dal punto di vista circuitale ci si avvicina maggiormente al caso di perfetta compensazione, con tutto ciò che ne deriva: tensioni leggermente superiori 420 V, potenza reattiva pari a 6,6 kVAR e una potenza trasmessa pari a 30 kW. Il rendimento totale del sistema è del 96,53%, con una quota di perdite aggiuntive del 1,44%.

120 mm Quest'ultimo caso preso in esame conferma la tendenza dei comportamenti visti finora: il campo risulta ulteriormente più schiacciato e ovalizzato, raggiungendo il valore limite ad 1,4 m di distanza. Questo va ad intensificare gli effetti delle potenze dissipate sulle estremità delle paratie laterali dello schermo, raggiungendo il valore di $62,13 \text{ A/m}^2$, creando tuttavia una possibile criticità dal punto di vista termico. La potenza dissipata sulla superficie maggiore è ancora minore, visto il progressivo allontanamento dell'avvolgimento, e vale complessivamente 402 W.

Dal punto di vista dell'alimentazione si notano alcune discrepanze con l'andamento visto in precedenza: il flusso concatenato dall'avvolgimento è superiore grazie alla presenza della schermatura che confina maggiormente il campo. Questo fa sì che il sistema risulti sovracompensato e il generatore debba assorbire potenza capacitiva pari a 60 kVAR e reistere ad una tensione di circa 900 V. Inoltre, la potenza trasmessa aumenta fino a 36,5 kW, il rendimento totale sale a 97,02% e la quota delle perdite di dissipazione scende all'1,10%.

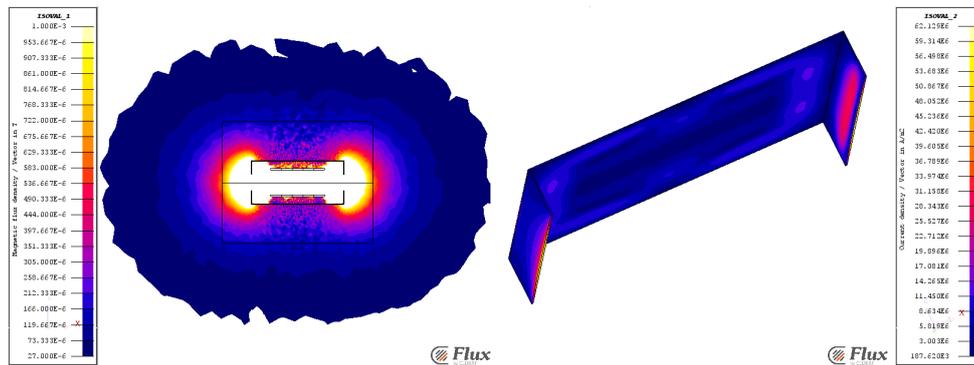


Figura 4.13: Campo e densità di corrente sullo schermo.

Comparando i risultati ottenuti si vede che aumentando la distanza dello schermo dagli avvolgimenti si diminuiscono progressivamente le correnti indotte e le perdite, oltre che a modificare in modo non monotono le grandezze all'alimentazione, evidenziando la condizione di ottimo nel secondo caso esaminato. Per quanto riguarda il profilo del campo prodotto, i valori superiori ad 1 mT son sempre contenuti all'interno dello schermo, mentre si aumenta la distanza alla quale si raggiunge il limite imposto dalla normativa. Quindi, anche poiché nel caso di 120 mm lo schermo influenza pesantemente il sistema studiato, la scelta ricade sul caso intermedio poiché garantisce sia gli standard di sicurezza sia quelli di performance richiesti. Se si adotta questa soluzione è da evidenziare come la distanza di 1 m sia ampiamente sufficiente a coprire la larghezza della carreggiata e garantisca la sicurezza dei pedoni. Inoltre, grazie alla forma più schiacciata del campo, l'abitacolo risulta più schermato e meno soggetto al campo magnetico prodotto.

4.3 Stima dei costi

In ultima istanza, si vuole dare uno sguardo alla sostenibilità economica del sistema, facendo una stima dei prezzi non in scala del sistema. Partendo dal sistema vero e proprio il costo verificato per un singolo nucleo di ferrite è di circa 5 €, ed essendo presenti 25 nuclei per pad, avrà un costo totale di 125 €. Per quanto riguarda lo schermo di alluminio, il suo volume è pari a $2,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, per un peso di circa 7 kg: il suo costo è di 2,5 €/kg per un totale di 18 €. Passando ora agli avvolgimenti è necessario fare una considerazione: il filo Litz impiegato rappresenta solo una parte esigua del costo infatti, la maggior parte di esso è dovuta all'utilizzo del macchinario che sagoma il supporto di tutto l'apparato e nel quale viene inserito l'avvolgimento. In ogni caso il filo Litz della tipologia scelta ha un costo di circa 5 €/m, la lunghezza per ogni pad stimata è di 3 m, comportando una spesa di 15 €/pad. Il costo della lavorazione complessiva da alcuni preventivi esaminati può essere valutata circa 200 €/pad. L'ultimo aspetto riguarda i condensatori, che sono i componenti più sollecitati e devono sopportare una tensione di 17 kV, si fa quindi riferimento a dei condensatori ceramici il cui prezzo varia considerevolmente in funzione della capacità: si passa da 10 a 50 €. Tuttavia, in ogni caso, per creare un banco della capacità desiderata si

spendono all'incirca di 70 €. Quindi per un solo pad la spesa complessiva sarà di circa 400 €: nel nostro caso vengono impiegati 134 pad lungo 100 m di linea più quello ricevitore, con un costo degli apparati di 54.000 €. Inoltre sono da considerare le spese per l'impianto da installare che sono quantificabili in 30.000 €.

Tuttavia la maggior parte della spesa risiede negli apparati di conversione e alimentazione del sistema: infatti per ogni convertitore utilizzato bisogna spendere circa 15.000 €. Ciò è dovuto alla complessità del sistema da implementare che deve inglobare anche il sistema di raffreddamento ad acqua degli IGBT. Il costo fa riferimento ad un generatore in grado di erogare 40 kW, di interfacciarsi con la comune rete elettrica e di regolare la potenza in uscita dal 20 al 100%. Questa cifra deve essere moltiplicata per il numero di alimentatori necessari a far funzionare il sistema e qui si vede la necessità di implementare un sistema di controllo attivo, in modo da limitare al massimo la necessità di questi sistemi. Infatti nel caso in studio, la spesa sarebbe di 2.010 k€, decisamente troppo elevata per una sua implementazione. Ad esempio se si riuscisse ad alimentare con lo stesso generatore almeno un tratto di 25 m, attraverso degli switch posti su ogni pad, la spesa risulterebbe di 60.000 €, ottenendo un totale di 144.000 €. Sempre ricordando che nel momento di un'entrata in produzione del sistema, i costi sicuramente subirebbero un abbattimento tale da rendere più appetibile il sistema.

Conclusione

Con questo lavoro, si è mostrato il procedimento al fine di dimensionare e ottimizzare al meglio la parte elettromagnetica di un sistema WPT per veicoli elettrici commerciali, focalizzandosi in particolar modo sull'accoppiamento tra i due sistemi sorgente e ricevitore. Sul compromesso tra miglior coefficiente di accoppiamento e dimensioni, si è determinata la miglior configurazione possibile per due diversi tipi di avvolgimento. Si è verificato che la tipologia a doppia D garantisce un miglior funzionamento con disallineamenti lungo l'asse di marcia, quindi preferibile per questa particolare applicazione. Si è proceduto con la messa in risonanza del sistema e la scelta della sorgente di energia del sistema: per ottenere un profilo di potenza più piatto possibile si è optato per il generatore di corrente. Anche se l'utilizzo di quello di tensione non deve essere considerato un errore, in quanto permette di limitare la potenza reattiva in gioco, oltre a fornire una più pratica alternativa nella scelta dell'elettronica di potenza associata. Come generatore si è scelto un inverter a corrente impressa con un carico risonante che permette di essere utilizzato anche con potenza capacitiva. In seguito, si è stabilita la distanza ottimale tra due pad sorgenti al fine di garantire che la potenza media trasmessa fosse adeguata alla sua applicazione. Una volta configurato il sistema finale, si sono verificati gli standard di sicurezza imposti dalla normativa mediante l'introduzione di uno schermo di cui si sono verificate anche le temperature raggiunte l'esercizio, dovute all'effetto Joule delle correnti parassite. Per concludere si è quindi proceduto effettuando una stima del costo al chilometro di tale sistema, sulla base dei prezzi commerciali trovati dai siti dei produttori delle varie componenti, senza applicare quindi l'economia di scala.

I risultati ottenuti sono molto incoraggianti in quanto si riesce a trasmettere una potenza media di 28,3 kW ad una distanza di 20 cm al veicolo che viaggia quindi come fosse connesso tramite un pantografo alla linea elettrica, senza tuttavia avere né la linea né il pantografo stessi. I rendimenti del collegamento wireless sono dell'ordine del 95% che, sommati a quelli dell'elettronica stimabili nel caso peggiore in un 0,9 per ogni step, porta ad un rendimento complessivo del sistema del 77%. Gli ingombri e i pesi del sistema sono ridotti: il pad misura 800x650x100 mm, non limitando particolarmente la capacità di carico del veicolo sulla quale è installato, e pesando circa 20 kg, ampiamente sostenibile dalla tipologia di veicolo in questione. Il peso risulta marginale anche grazie alla riduzione che può subire il pacco batterie nel momento in cui il veicolo si muova spesso alimentato. In ogni caso, grazie a questo sistema, l'autonomia risulta enormemente incrementata e adatta ai veicoli commerciali, grandi macinatori di chilometri, andando ad eliminare il problema della range anxiety e spalancando le porte ad

una mobilità molto più ecosostenibile. Il tutto senza rappresentare un pericolo grazie alla schermatura dei campi magnetici, che rispetta le normative vigenti ad un metro dall'apparato.

Tuttavia alcune criticità sono emerse durante lo studio e dovranno essere oggetto degli sviluppi di questa tecnologia. Innanzitutto il costo: per abbatterlo è necessario implementare un sistema di controllo e connessione degli apparecchi sorgente, in modo da limitare i convertitori necessari. La logica di controllo dovrà inoltre essere in grado di sostenere uno scenario di traffico, magari regolato e con delle limitazioni di velocità, di tutt'altro che semplice integrazione. Questo è il principale ostacolo verso l'utilizzo di questa tecnologia. Nel caso studio, un'ulteriore passo in avanti può essere effettuato nella compensazione che potrebbe essere migliorata al fine di ottenere sempre il funzionamento in compensazione del sistema, senza dover sovradimensionare l'elettronica di potenza associata.

L'utilizzo di questo sistema porterebbe indubbi benefici all'ambiente urbano in particolar modo, dotando i veicoli elettrici di molta più autonomia e rendendoli più user-friendly, eliminando le fastidiose prese e cavi di alimentazione. I trasporti diverrebbero molto più silenziosi e le città molto meno caotiche, incrementando notevolmente la qualità della vita. Molto è stato fatto, ma tanto resta ancora da fare per affinare la tecnica in questo campo, per rendere il sistema WPT il riferimento per la mobilità elettrica.

Bibliografia

- [1] Siqu Li, Chris Mi, *Wireless Power Transfer Through for Electric Vehicle Applications*, 2015.
- [2] G. Nagendra, G. Covic, J. Boys *Determining the physical size of inductive couplers for IPT EV system*, in "IEEE Journal of emerging and selected topics in Power Electronics", Vol. 2, n° 3, 571-583.
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [3] B. Ni, C. Chung, H. Chang, *Design and comparison of Parallel and Series Resonant Topology in Wireless Power Transfer*, in "8th Conference of Industrial Electronics and Applications" IEEE, 2013, 1832-1837.
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [4] Ganesh Nagendra et al., *Design of a double coupled IPT EV highway*, IEEE, 2013, 4606-4611.
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [5] M. Budhia et al., *Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging system*, in "Transaction on industrial electronics" IEEE, 2011, 318-329.
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [6] R. Salтанovs, *Multicapacitor circuit application for the wireless energy transmission system coils resonant frequency adjustment*, IEEE, 2015.
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [7] I. Suh et al., *Application of shaped magnetic field in resonance technology of future urban transportation*, in "CIRP Design Conference" KAIST, 2011, 226-233.
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [8] S. Lee et al., *On-line electric vehicle using IPT system*, IEEE, 2010, 1598-1601.
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [9] S. Ahn et al., *Magnetic Field Design for Low EMF and High Efficiency Wireless Power Transfer System in On-Line Electric Vehicles*, in "CIRP Design Conference", KAIST, 2011, 233-239.
<http://www.ieeeexplore.org/>

- [10] M. Bojarski et al., *Three-phase Resonant Inverter for Wireless Power Transfer*, IEEE, 2015.
<http://www.ieeeexplore.org/>
- [11] G. Covic et al., *A Bipolar Primary Pad Topology for EV Stationary Charging and Highway Power by Inductive Coupling*, IEEE, 2011.
<http://www.ieeeexplore.org/>