



Ricerca di Sistema elettrico

Studio di fattibilità per un impianto di ricarica contactless

Giuseppe Buja, Manuele Bertoluzzo



STUDIO DI FATTIBILITÀ PER UN IMPIANTO DI RICARICA CONTACTLESS

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

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Progetto: Prodotti per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

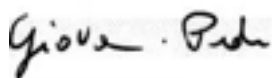
Obiettivo: Componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi, per la ricarica rapida in c.a. ed in c.c.

Sub-task A1: ricarica rapida in c.a.

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "Studio di fattibilità per un impianto di ricarica contactless"

Responsabile scientifico ENEA: Giovanni Pedè



Responsabile scientifico Università di Padova: Giuseppe Buja

Indice

SOMMARIO.....	5
1. INTRODUZIONE.....	6
1.1 SEZIONE DI TRASFERIMENTO DELL'ENERGIA.....	7
1.2 FIGURE DI MERITO	7
2. STEESC INDUTTIVO	8
2.1 FIGURE DI MERITO DI UNO STEESC INDUTTIVO.....	8
3. STEESC RISONANTE.....	9
3.1 FIGURE DI MERITO DI UNO STEESC RISONANTE.....	10
3.2 STEESC RISONANTE VS. STEESC INDUTTIVO.....	11
3.3 ANALISI DELLE CARATTERISTICHE DI UNO STEESC RISONANTE	13
4. PROGETTO DELLO STEESC RISONANTE	14
4.1 DATI FUNZIONALI RELATIVI AL CASO DI STUDIO.....	14
4.2 REQUISITI DELLO STEESC RISONANTE.....	16
5. INDAGINE SULLA CONFIGURAZIONE DELLE BOBINE.....	16
5.1 DATI DI PROGETTO DELLE BOBINE.....	16
5.2 DIMENSIONAMENTO DELLE BOBINE	16
6. ANALISI NUMERICA DELLO STEESC PROGETTATO	19
7. INVERTITORE AD ALTA FREQUENZA	19
7.1 SCELTA DEGLI INTERRUITORI ELETTRONICI DI POTENZA	21
8. SPECIFICHE TECNICHE DELL'IMPIANTO DI RICARICA CONTACTLESS	20
8.1 SOTTOSISTEMI DI POTENZA	20
8.2 DESCRIZIONE FUNZIONALE.....	20
8.3 SPECIFICHE DEI COMPONENTI DI POTENZA.....	21
9. CONCLUSIONI	23
APPENDICE.....	24
ACRONIMI E SIMBOLI	25

Sommario

I Sistemi di Trasferimento dell'Energia Elettrica Senza Contatto (STEESC) possono essere vantaggiosamente utilizzati per ricaricare gli accumulatori dei veicoli elettrici poiché offrono maggiore sicurezza e praticità dei sistemi di ricarica convenzionali basati su spine, cavi e prese. Nel presente documento sono illustrati i principi di funzionamento degli STEESC ad accoppiamento induttivo sia che abbiano una topologia induttiva (STEESC induttivi) oppure una topologia risonante (STEESC risonanti), mostrando la convenienza degli STEESC risonanti rispetto a quelli induttivi. Utilizzando le formulazioni ricavate, è quindi svolto il dimensionamento di uno STEESC risonante destinato alla carica degli accumulatori di una city car elettrica, scelta come caso di studio. Infine sono fornite le specifiche tecniche dell'impianto di ricarica contactless.

Il documento è organizzato come segue: l'introduzione è dedicata alla descrizione dei principi di funzionamento degli STEESC ad accoppiamento induttivo e alla definizione delle grandezze elettriche coinvolte nel loro funzionamento; in particolare sono introdotte figure di merito -non tutte reperibili in letteratura- adatte alla valutazione delle loro caratteristiche. I capitoli 2 e 3 riportano il calcolo delle figure di merito degli STEESC induttivi e di quelli risonanti con topologia serie-serie; dal confronto delle figure di merito dei due tipi di STEESC emerge inequivocabilmente la convenienza dell'utilizzo di STEESC risonanti per l'applicazione considerata (ricarica degli accumulatori di veicoli elettrici). Le caratteristiche di uno STEESC risonante sono quindi esaminate in diverse condizioni di lavoro. Nel capitolo 4 sono ricavati dati funzionali relativi al caso di studio e sono stabilite le prestazioni richieste allo STEESC. Il capitolo 5, partendo dalle prestazioni richieste allo STEESC, ricava i dati di progetto per i parametri induttivi delle bobine e quindi procede al loro dimensionamento. Il dimensionamento viene condotto in due fasi, dapprima effettuandolo mediante approccio analitico e poi perfezionando i risultati per mezzo di un software agli elementi finiti. Nel capitolo 6, per mezzo di un software per la simulazione di circuiti elettrici, viene analizzato il comportamento elettrico dello STEESC progettato rimuovendo le ipotesi di idealità introdotte nella fase di progetto al fine di semplificarlo. I risultati ottenuti dall'analisi circuitale confermano la correttezza delle scelte progettuali. Nel capitolo 7 è riportato uno schema di principio dell'invertitore in alta frequenza che alimenta la bobina trasmittente e vengono suggerite alcune linee guida per la selezione degli interruttori elettronici di potenza con cui realizzarlo. Il capitolo 8 fornisce le specifiche tecniche dei componenti sia della sezione di trasferimento di energia sia dei convertitori statici necessari per il funzionamento dell'impianto di ricarica contactless. Il capitolo 9 conclude la relazione. In appendice sono riportate le principali caratteristiche della city car elettrica impiegata come caso di studio.

1. Introduzione

Un Sistema di Trasferimento dell'Energia Elettrica Senza Contatto (STEESC) consente di trasferire energia elettrica da una sorgente ad un utilizzatore senza alcun cavo elettrico di connessione tra le due parti. La tecnologia più conveniente per la realizzazione di uno STEESC è quella dell'accoppiamento induttivo. In effetti, STEESC a bassa potenza con topologia formata unicamente da bobine strettamente accoppiate (STEESC induttivi) sono disponibili da qualche anno, mentre in tempi recenti è cresciuto l'interesse per il trasferimento di energia a media-alta potenza tra bobine poste a una distanza relativamente elevata e non esattamente sovrapposte. Una tipica applicazione di questo tipo è la ricarica delle batterie dei Veicoli Elettrici (VE). Per ottenere una buona efficienza nel trasferimento dell'energia tra bobine debolmente accoppiate, i) gli STEESC sono alimentati con tensioni e/o correnti alternate di frequenza elevata, ii) le induttanze delle bobine sono compensate per mezzo di condensatori che risuonano con esse alla frequenza di alimentazione; gli STEESC di questo tipo sono comunemente detti risonanti, e iii) le bobine vengono dotate di nuclei in ferrite con lo scopo di aumentare l'accoppiamento tra di esse; l'uso della ferrite consente di limitare le perdite magnetiche nel nucleo prodotte dal funzionamento ad alta frequenza.

La Fig. 1.1 mostra lo schema di principio di uno STEESC ad accoppiamento induttivo per la ricarica degli accumulatori di un VE. Esso si compone di due sezioni staccate: la sezione trasmittente (o primaria) e la sezione ricevente (o secondaria), ciascuna delle quali comprende una bobina che è accoppiata alla bobina dell'altra sezione. La bobina di trasmissione è installata sotto la superficie stradale mentre la bobina ricevente è incorporata nel pianale del VE. Entrambe le sezioni dello STEESC comprendono convertitori statici di energia elettrica. L'insieme delle due bobine e dei condensatori di compensazione, presenti negli STEESC risonanti, forma lo stadio di trasferimento di energia ed opera in regime sinusoidale.

Nella sezione trasmittente, la rete elettrica $\bar{V}_g$ alimenta la bobina primaria per mezzo di un Raddrizzatore a Diodi (DR_T) con filtro capacitivo in uscita, seguito da un Invertitore monofase in Alta Frequenza (HFI). Pertanto la rete elettrica, il raddrizzatore a diodi e l'invertitore costituiscono il sistema di alimentazione dello STEESC e sono equivalenti a un generatore di tensione sinusoidale con resistenza interna. La frequenza della tensione generata è tipicamente di alcune decine di kHz. La tensione e la corrente della bobina trasmittente sono indicate con $\bar{V}_T$ e $\bar{I}_T$.

Nella sezione ricevente, la bobina secondaria ricarica gli accumulatori per mezzo di un altro Raddrizzatore a Diodi (DR_R) con filtro di uscita capacitivo, seguito da un chopper che adatta la corrente e/o la tensione di uscita alle specifiche di ricarica degli accumulatori. Pertanto il raddrizzatore a diodi, il chopper e gli accumulatori costituiscono il carico dello STEESC e sono equivalenti a una resistenza. La tensione e la corrente della bobina ricevente sono indicate con $\bar{V}_R$ e $\bar{I}_R$ mentre la tensione e la corrente della resistenza equivalente di carico sono indicate con $\bar{V}_L$ e $\bar{I}_L$.

In funzione del collegamento in serie o in parallelo dei condensatori utilizzati per compensare l'induttanza delle bobine, si possono riconoscere quattro topologie di STEESC risonanti: serie-serie, serie-parallelo, parallelo-serie e parallelo-parallelo. Per esempio, la topologia serie-serie ha i condensatori collegati in serie sia alla bobina della sezione trasmittente sia a quella della sezione ricevente.

Il funzionamento di uno STEESC risonante dipende dalla topologia circuitale dello stadio di trasferimento dell'energia e dalla configurazione delle bobine di accoppiamento. Per quanto riguarda la topologia circuitale, il documento considera la topologia serie-serie ed esamina le sue caratteristiche impiegando le seguenti figure di merito: efficienza del trasferimento di energia, fattori di dimensionamento del generatore equivalente di tensione e della bobina ricevente, e ampiezza in per unità (pu) della corrente di carico. I dati di progetto per i parametri delle bobine, ossia le autoinduttanze e la mutua induttanza, sono quindi determinati sulla base dei dati funzionali degli accumulatori da ricaricare e delle prestazioni richieste allo STEESC. Per quanto riguarda la configurazione delle bobine, il documento considera bobine con nucleo di ferrite di forma diversa e, per ogni forma, indaga la struttura delle bobine che fornisce i valori di progetto per i parametri induttivi.

Lo studio di fattibilità è rivolto alla progettazione di un impianto di ricarica contactless degli accumulatori di una city-car elettrica, scelta come caso di studio.

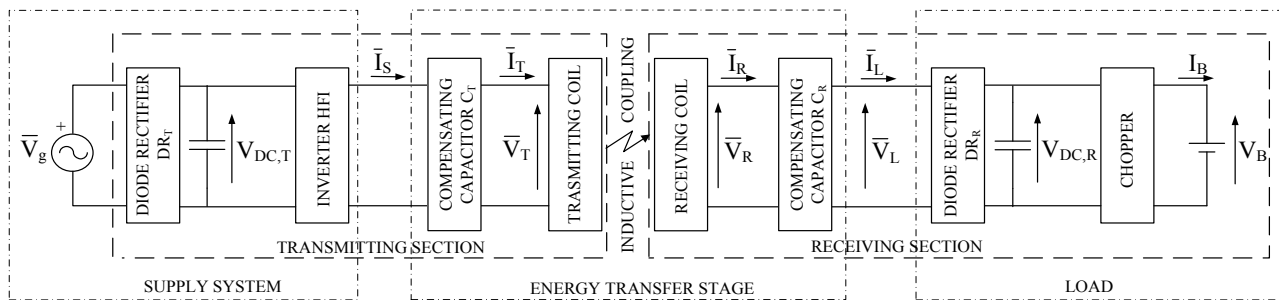


Figura 1.1. Schema di principio di uno STEESC ad accoppiamento induttivo per la ricarica degli accumulatori di un VE.

1.1 Sezione di trasferimento dell'energia

Lo stadio di trasferimento dell'energia di uno STEESC ad accoppiamento induttivo è mostrata in Fig. 1.2, dove $\bar{V}_S$, $\bar{I}_S$ e R_S sono la tensione, la corrente e la resistenza interna del generatore equivalente di tensione rappresentativo del sistema di alimentazione, M è la mutua induttanza tra le bobine trasmittente e ricevente, ed R_L è la resistenza equivalente rappresentativa del carico dello STEESC. Sia ω la pulsazione del generatore di tensione $\bar{V}_S$.

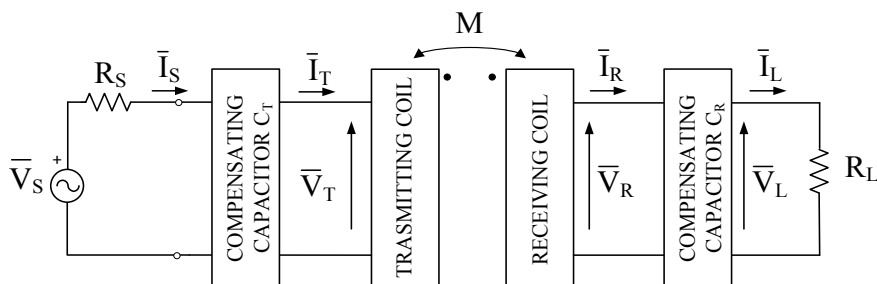


Figura 1.2. Stadio di trasferimento dell'energia di uno STEESC ad accoppiamento induttivo per la ricarica degli accumulatori di un VE.

1.2 Figure di merito

Le figure di merito definite nella (1.1) sono state considerate per eseguire il progetto dello STEESC. Esse sono l'efficienza del trasferimento di energia η , il fattore di dimensionamento del generatore (equivalente) di tensione α , il fattore di dimensionamento della bobina ricevente β , e l'ampiezza in pu della corrente di carico $I_{L,pu}$, quest'ultima espressa come frazione del valore base di corrente $V_S/\omega M$. Le variabili che compaiono nelle definizioni delle figure di merito sono la potenza attiva P_L assorbita dal carico, data da $R_L I_L^2$, la potenza attiva P_S e la potenza apparente A_S erogate dal generatore di tensione alternata, date rispettivamente da $V_S I_S \cos(\theta)$ e da $V_S I_S$, e la potenza apparente A_R della bobina ricevente, data da $V_R I_R$.

$$\begin{cases} \eta = \frac{P_L}{P_S} \\ \alpha = \frac{A_S}{P_L} \\ \beta = \frac{A_R}{P_L} \\ I_{L,pu} = \frac{I_L}{V_S/\omega M} \end{cases} \quad (1.1)$$

Nei paragrafi seguenti le figure di merito dello STEESC sono espresse in funzione del coefficiente di accoppiamento k delle bobine

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_T L_R}} \quad (1.2)$$

e dei fattori di qualità Q_T e Q_R delle sezioni trasmittente e ricevente

$$\begin{cases} Q_T = \frac{\omega L_T}{R_T + R_S} \\ Q_R = \frac{\omega L_R}{R_R + R_L} \end{cases} \quad (1.3)$$

2. STEESC induttivo

La rappresentazione circuitale di uno STEESC induttivo è riportata in Fig. 2.1, dove L_T e R_T sono l'autoinduttanza e la resistenza della bobina trasmittente ed L_R e R_R sono l'autoinduttanza e la resistenza della bobina ricevente. In uno STEESC induttivo valgono le seguenti relazioni per le correnti e per le tensioni delle sezioni trasmittente e ricevente:

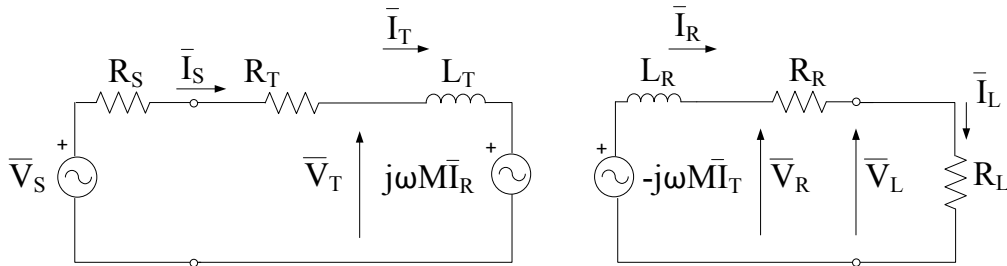


Figura 2.1. Rappresentazione circuitale di uno STEESC induttivo.

$$\begin{cases} \bar{I}_S = \bar{I}_T \\ \bar{I}_L = \bar{I}_R \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} \bar{V}_S = \dot{Z}_T \bar{I}_T + j\omega M \bar{I}_R \\ -j\omega M \bar{I}_T = \dot{Z}_R \bar{I}_R \end{cases} \quad (2.2)$$

dove $\dot{Z}_T$ e $\dot{Z}_R$ sono le impedenze equivalenti delle sezioni trasmettenti e riceventi. Elaborando le (2.2), le correnti che percorrono le due bobine possono essere scritte nella forma

$$\begin{cases} \bar{I}_T = \frac{\dot{Z}_R}{\dot{Z}_T \dot{Z}_R + \omega^2 M^2} \bar{V}_S \\ \bar{I}_R = -\frac{j\omega M}{\dot{Z}_T \dot{Z}_R + \omega^2 M^2} \bar{V}_S \end{cases} \quad (2.3)$$

2.1 Figure di merito di uno STEESC induttivo

Il calcolo delle figure di merito di uno STEESC induttivo porta alle seguenti espressioni:

$$\begin{cases} \eta_i = \frac{\omega^2 M^2 \Re[\dot{Z}_R]}{|\dot{Z}_R|^2 \Re[\dot{Z}_T] + \omega^2 M^2 \Re[\dot{Z}_R]} \\ \alpha_i = \frac{|\dot{Z}_R| |\dot{Z}_T \dot{Z}_R + \omega^2 M^2|}{\omega^2 M^2 \Re[\dot{Z}_R]} \\ \beta_i = \frac{|\dot{Z}_R - j\omega L_R|}{\Re[\dot{Z}_R]} \\ I_{L,pu,i} = \frac{\omega^2 M^2}{|\dot{Z}_T \dot{Z}_R + \omega^2 M^2|} \end{cases} \quad (2.4)$$

La resistenza della bobina trasmittente R_T è usualmente trascurabile rispetto alla resistenza interna del generatore R_S e la resistenza della bobina ricevente R_R è trascurabile rispetto alla resistenza equivalente di carico R_L . Di conseguenza le impedenze equivalenti delle sezioni trasmittente e ricevente sono rispettivamente uguali a

$$\begin{cases} \dot{Z}_T = R_S + j\omega L_T \\ \dot{Z}_R = R_L + j\omega L_R \end{cases} \quad (2.5)$$

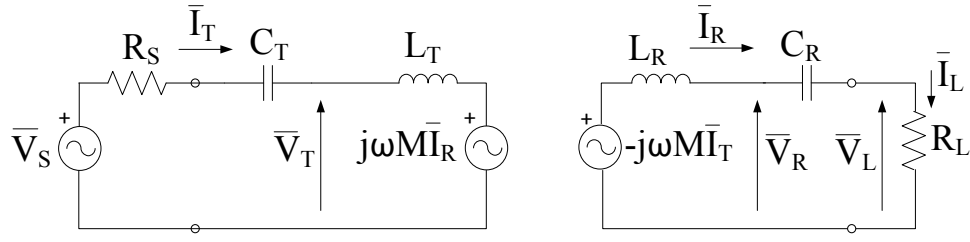
Sostituendo le (2.5) nelle (2.4) e impiegando le grandezze in (1.2) e (1.3), le figure di merito in (2.4) possono essere riscritte nella forma

$$\begin{cases} \eta_i = \frac{k^2 Q_R Q_T}{1 + Q_R^2 + k^2 Q_R Q_T} \\ \alpha_i = \frac{\sqrt{(1 + Q_R^2)[(1 + (k^2 - 1)Q_R Q_T)^2 + (Q_R + Q_T)^2]}}{k^2 Q_R Q_T} \\ \beta_i = 1 \\ I_{L,pu,i} = \frac{k^2 Q_R Q_T}{\sqrt{(1 + (k^2 - 1)Q_R Q_T)^2 + (Q_R + Q_T)^2}} \end{cases} \quad (2.7)$$

dove il pedice i indica che le figure di merito si riferiscono ad uno STEESC induttivo.

3. STEESC risonante

Lo STEESC risonante considerato nel documento ha la topologia serie-serie. Esso include due condensatori: uno collegato in serie alla bobina trasmittente e l'altro alla bobina ricevente, come mostrato in Fig. 3.1.



3.1 Rappresentazione circuitale di uno STEESC risonante con topologia serie-serie.

Le impedenze equivalenti delle sezioni trasmittente e ricevente sono

$$\begin{cases} \dot{Z}_T = R_S + j\omega L_T + \frac{1}{j\omega C_T} \\ \dot{Z}_R = R_L + j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R} \end{cases} \quad (3.1)$$

In condizioni di risonanza si ha

$$\begin{cases} \omega_{\text{ris}}^2 = \frac{1}{C_T L_T} \\ \omega_{\text{ris}}^2 = \frac{1}{C_R L_R} \end{cases} \quad (3.2)$$

dove ω_{ris} è la pulsazione di risonanza delle due bobine. In condizioni di risonanza $\dot{Z}_R$ e $\dot{Z}_T$ si riducono quindi a

$$\begin{cases} \dot{Z}_R = R_L \\ \dot{Z}_T = R_S \end{cases} \quad (3.3)$$

3.1 Figure di merito di uno STEESC risonante

Poiché le (2.1) valgono anche per uno STEESC risonante con topologia serie-serie, le sue figure di merito sono ancora espresse dalle (2.4). Sostituendo le impedenze (3.3) nelle (2.4), le figure di merito possono essere scritte nella forma

$$\begin{cases} \eta_r = \frac{k^2 Q_T Q_R}{1 + k^2 Q_T Q_R} \\ \alpha_r = \frac{1 + k^2 Q_T Q_R}{k^2 Q_T Q_R} \\ \beta_r = \sqrt{1 + Q_R^2} \\ I_{L,pu,r} = \frac{k^2 Q_T Q_R}{1 + k^2 Q_T Q_R} \end{cases} \quad (3.4)$$

dove il pedice r indica che le figure di merito si riferiscono ad uno STEESC risonante.

Le (3.4) mostrano che l'efficienza del trasferimento di energia e l'ampiezza in pu della corrente di carico hanno la stessa espressione. L'uguaglianza delle due espressioni può essere facilmente giustificata col fatto che in risonanza le impedenze della sezione trasmittente e di quella ricevente sono puramente resistive e quindi il generatore di tensione fornisce solamente potenza attiva; tale potenza è in parte dissipata in R_s e in parte utilizzata dal carico. Dalle relazioni (3.4) emerge inoltre che:

- i) tutte le figure di merito dipendono dal fattore di qualità della sezione ricevente e quindi dalla resistenza di carico dello STEESC risonante; l'efficienza del trasferimento di energia, il fattore di dimensionamento del generatore di tensione e l'ampiezza in pu della corrente di carico dipendono anche dal coefficiente di accoppiamento,
- ii) il fattore di dimensionamento del generatore di tensione è uguale all'inverso dell'efficienza del trasferimento di energia,
- iii) un elevato coefficiente di accoppiamento consente di ottenere elevati valori di efficienza del trasferimento di energia e di ampiezza in pu della corrente di carico e bassi valori del coefficiente di dimensionamento del generatore di tensione,
- iv) il fattore di dimensionamento della bobina ricevente dipende unicamente dal fattore di qualità della rispettiva sezione.

L'espressione di $\bar{I}_{L,r}$, ottenuta dalla (3.3) e dall'ultima delle (3.4), è

$$\bar{I}_{L,r} = \frac{\bar{V}_s}{j\omega M} \left(\frac{k^2 Q_T Q_R}{1 + k^2 Q_T Q_R} \right) = \frac{\bar{V}_s}{j\omega M} \eta_r \quad (3.5)$$

Essa mostra che $\bar{I}_{L,r}$ è in quadratura rispetto a $\bar{V}_s$; inoltre dalla (3.5) si evince che per una resistenza di carico quasi costante (e quindi per un'efficienza del trasferimento di energia quasi costante), lo STEESC risonante si comporta come un generatore di corrente con valore di corrente che può essere regolato agendo sull'ampiezza della tensione fornita dal generatore di tensione.

3.2 STEESC risonante vs. STEESC induttivo

Il confronto tra uno STEESC risonante e uno STEESC induttivo è condotto con l'aiuto delle figure di merito calcolate in precedenza. I loro grafici sono riportati nelle Figg. 3.2-3.5 in funzione del fattore di qualità Q_R della sezione ricevente e ponendo $Q_T=1000$ e $k=0.2$. Le figure di merito dello STEESC induttivo sono tracciate con linea rossa tratteggiata mentre quelle dello STEESC risonante sono tracciate con linea blu continua.

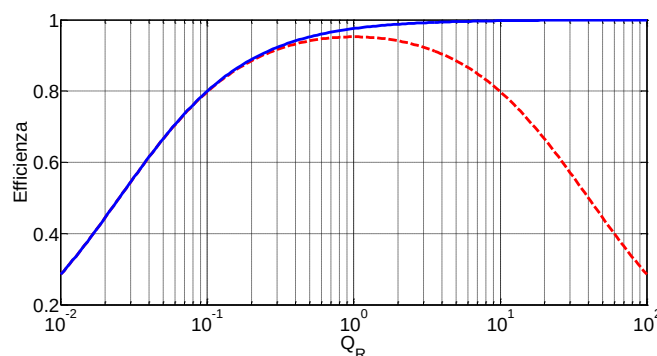


Figura 3.2. Efficienza del trasferimento di energia di uno STEESC induttivo (linea rossa tratteggiata) e di uno STEESC risonante (linea blu continua) in funzione di Q_R .

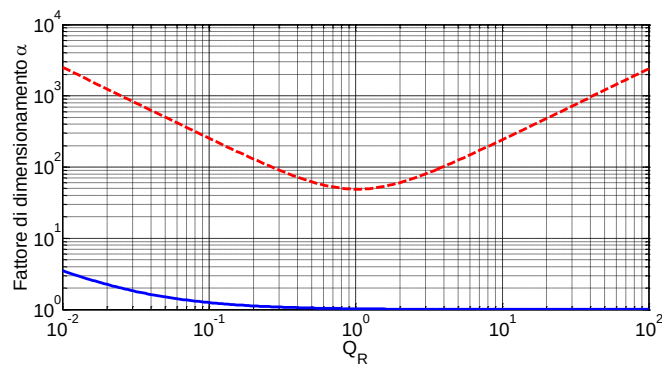


Figura 3.3. Fattore di dimensionamento del generatore di tensione di uno STEESC induttivo (linea rossa tratteggiata) e di uno STEESC risonante (linea blu continua) in funzione di Q_R .

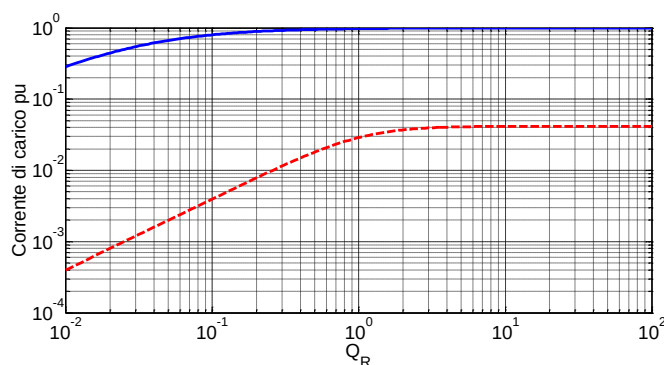


Figura 3.4. Ampiezza in pu della corrente di carico di uno STEESC induttivo (linea rossa tratteggiata) e di uno STEESC risonante (linea blu continua) in funzione di Q_R .

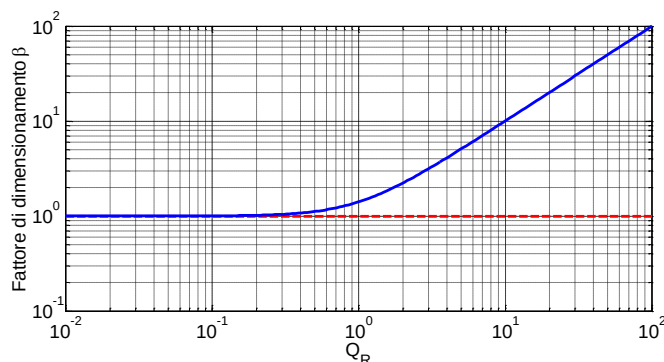


Figura 3.5. Fattore di dimensionamento della bobina ricevente di uno STEESC induttivo (linea rossa tratteggiata) e di uno STEESC risonante (linea blu continua) in funzione di Q_R .

La Fig. 3.2 mostra che l'efficienza del trasferimento di energia di uno STEESC induttivo assume un valore massimo per $Q_R=1$ mentre è una funzione crescente di Q_R in uno STEESC risonante. La figura mette in evidenza che l'efficienza del trasferimento di energia di uno STEESC induttivo i) resta sempre inferiore a quella di uno STEESC risonante, ii) risulta elevata solo in un intervallo relativamente ristretto di valori di Q_R . Nell'applicazione considerata (ricarica degli accumulatori di un VE), la resistenza equivalente di carico dello STEESC -e quindi Q_R - è soggetta ad ampie variazioni durante il processo di ricarica (vedi paragrafo 4.1). Pertanto, tenendo di questa caratteristica applicativa, è preferibile l'impiego di uno STEESC risonante. La Fig. 3.3 riporta i grafici del fattore di dimensionamento del generatore di tensione. Anche in questo caso è evidente la convenienza di uno STEESC risonante rispetto a uno STEESC induttivo. Pur ponendosi nelle

migliori condizioni operative per uno STEESC induttivo, ossia per $Q_R=1$, esso richiede un dimensionamento del generatore di tensione per una potenza circa 50 volte maggiore di quella di uno STEESC risonante. Dalla figura si riconosce inoltre che uno STEESC risonante, a condizione che Q_R sia maggiore di 0.1, richiede invece una potenza di dimensionamento del generatore di tensione solo di poco superiore a quella assorbita dal carico.

La Fig. 3.4 mostra che l'ampiezza in pu della corrente di carico di uno STEESC risonante raggiunge valori prossimi all'unità anche quando Q_R è relativamente piccolo. Al contrario, l'ampiezza in pu della corrente di carico di uno STEESC induttivo è circa 25 volte inferiore anche per valori elevati di Q_R . Ciò significa che, a parità di corrente nel carico, uno STEESC induttivo richiede una tensione di alimentazione V_s considerevolmente più elevata di uno STEESC risonante.

La Fig. 3.5 mostra che il fattore di dimensionamento della bobina ricevente è costante ed uguale a 1 per uno STEESC induttivo mentre cresce con Q_R per uno STEESC risonante, coincidendo in pratica con Q_R quando Q_R è maggiore dell'unità. Un risultato simile si ottiene per la bobina trasmittente. Il dimensionamento delle bobine di uno STEESC risonante è pertanto più oneroso di quello delle bobine di uno STEESC induttivo e, assieme con l'utilizzo di condensatori, rappresenta la contropartita all'utilizzo della topologia risonante e ai benefici che essa comporta per le altre figure di merito.

3.3 Analisi delle caratteristiche di uno STEESC risonante

L'analisi delle caratteristiche di uno STEESC risonante è condotta con l'aiuto delle figure di merito calcolate in precedenza e considerando come caso di studio una city-car elettrica; i principali dati automobilistici riguardanti la city-car del caso di studio sono riportati in appendice.

Durante la ricarica degli accumulatori di un VE, la corrente di ricarica è in genere mantenuta costante e pari al valore nominale fino a quando la tensione degli accumulatori raggiunge il valore massimo; quindi la tensione viene mantenuta costante e pari al valore massimo della tensione sugli accumulatori mentre la corrente si riduce gradualmente fino al valore di fine ricarica. Pertanto, l'accumulatore si comporta come un carico resistivo, con una resistenza che assume un valore minimo all'inizio del processo di ricarica e che cresce mentre si procede col processo di ricarica. Di conseguenza, Q_R varia durante il processo di ricarica mentre Q_T è costante. Per questo motivo, le figure di merito di uno STEESC risonante sono analizzate in funzione di Q_R e per tre diversi valori di Q_T pari a 100, 300 e 1000. Il coefficiente di accoppiamento delle bobine è stato fissato a 0.2, che è un valore realistico per uno STEESC ad accoppiamento induttivo per l'applicazione considerata. Si noti che, in questa fase di progettazione di uno STEESC risonante, V_s , M e ω non sono noti e quindi l'ampiezza della corrente di carico non può essere valutata. Si può invece calcolare la sua ampiezza in pu, come definita nell'ultima delle (3.4).

In accordo con le (3.4), i grafici dell'efficienza del trasferimento di energia coincidono con quelli dell'ampiezza in pu della corrente di carico. Essi sono tracciati in Fig. 3.6 e mostrano che le due quantità aumentano in maniera monotona sia con Q_R che con Q_T , fino a raggiungere l'unità per valori elevati dei fattori di qualità delle sezioni. Il tasso di crescita è maggiore quando Q_R assume valori prossimi a 0.1 e diminuisce per valori inferiori e superiori di Q_R .

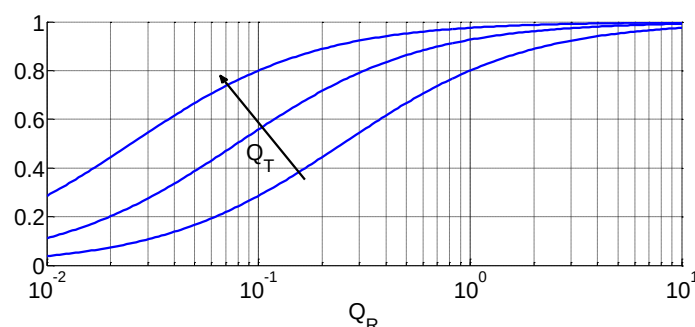


Figura 3.6. Efficienza del trasferimento di energia e ampiezza in pu della corrente di carico di uno STEESC risonante in funzione di Q_R e per diversi valori di Q_T .

I grafici del fattore di dimensionamento del generatore di tensione e del fattore di dimensionamento della bobina ricevente sono tracciati in Fig. 3.7 rispettivamente con linea rossa continua e con linea blu tratteggiata. I grafici mostrano che i) il fattore di dimensionamento del generatore di tensione decresce in maniera monotona con l'aumento sia di Q_R che di Q_T fino a raggiungere l'unità quando essi assumono valori elevati, ii) il fattore di dimensionamento della bobina ricevente aumenta in maniera monotona con Q_R ; per valori elevati di Q_R , in accordo con la terza delle (3.4), il fattore di dimensionamento della bobina ricevente risulta praticamente coincidente con Q_R .

Riassumendo quanto emerso dai risultati sopra ottenuti, appare chiara la necessità che uno STEESC risonante sia realizzato in modo da possedere elevati fattori di qualità al fine di ottenere valori ragionevoli per l'efficienza del trasferimento di energia, per il fattore di dimensionamento del generatore di tensione e per l'ampiezza in pu della corrente di carico. D'altro canto, un elevato fattore di qualità della sezione ricevente va a discapito del conseguimento di un alto fattore di dimensionamento per la relativa bobina. Per ottenere i valori richiesti per i fattori di qualità senza ricorrere a bobine con autoinduttanze troppo elevate, la soluzione comunemente adottata è quella di alimentare uno STEESC risonante ad alta frequenza. La scelta della frequenza di alimentazione deve essere compatibile con le capacità di commutazione e di dissipazione delle perdite nell'invertitore della sezione trasmittente e nel raddrizzatore a diodi della sezione ricevente.

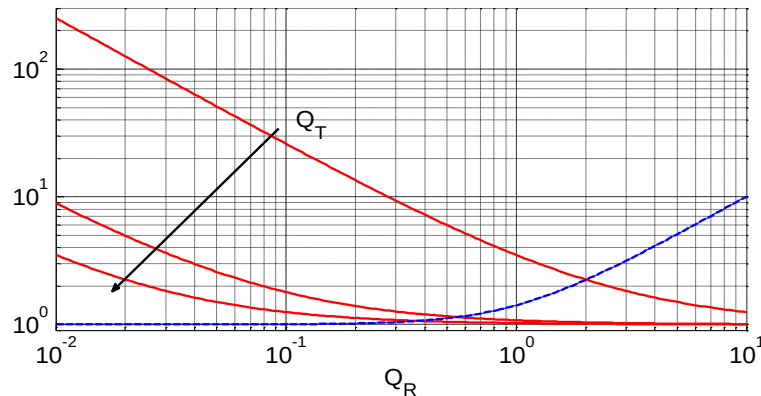


Figura. 3.7. Fattore di dimensionamento del generatore di tensione (linea rossa continua) e della bobina ricevente (linea blu tratteggiata) di uno STEESC risonante in funzione di Q_R e per diversi valori di Q_T .

4. Progetto dello STEESC risonante

4.1 Dati funzionali relativi al caso di studio

Le caratteristiche degli accumulatori della city car elettrica del caso di studio sono elencate nella parte superiore della Tab. 4.1. Utilizzando le caratteristiche degli accumulatori vengono calcolati il valore minimo e massimo della resistenza rappresentativa degli accumulatori nel corso del processo di ricarica. Da questi valori e considerando la variazione del duty-cycle del chopper dovuto all'aumento della tensione degli accumulatori durante il processo di ricarica, si ottiene la resistenza R_0 riportata all'ingresso del chopper. Dai calcoli risulta che R_0 diminuisce durante il processo di ricarica a corrente costante, raggiungendo il valore minimo quando la tensione degli accumulatori assume il valore massimo; durante il successivo processo di ricarica a tensione costante, R_0 cresce in maniera considerevole. Nota R_0 , si determina la resistenza riportata all'ingresso del raddrizzatore a diodi DR_R per mezzo della relazione (4.1). Essa rappresenta la resistenza equivalente del carico dello STEESC. I valori ricavati sono riportati in Tab. 4.1, dove i pedici m e M denotano valori minimi e massimi.

$$R_L = \frac{8}{\pi^2} R_0 \quad (4.1)$$

Nello stimare il valore di R_L in (4.1), si è ipotizzato che l'efficienza del sottosistema formato dal raddrizzatore a diodi DR_R e dal chopper sia pari al 90%.

4.2 Requisiti dello STEESC risonante

Affinché l'impianto di ricarica contactless abbia una elevata efficienza complessiva, conviene che l'ampiezza di picco V_s del generatore di tensione non sia troppo inferiore alla tensione di rete raddrizzata; inoltre, nell'ipotesi di utilizzare un chopper abbassatore nella sezione ricevente, conviene che la tensione V_{DC} del bus in continua all'ingresso del chopper non sia troppo superiore alla tensione degli accumulatori. In accordo ai requisiti sopra menzionati e alle cadute di tensione sui convertitori di potenza, si stabiliscono i valori minimi di V_s e V_{DC} .

Infine sono state definite la forma delle bobine e la frequenza della tensione di alimentazione. Per le bobine è stata scelta una forma circolare; il vincolo di installare la bobina ricevente sotto il pianale della city-car elettrica impone che il suo diametro sia pari a 0.4 m. Come primo tentativo, è stato scelto lo stesso diametro anche per la bobina trasmittente. La frequenza di alimentazione dello STEESC risonante è data dalla frequenza della tensione generata dall'invertitore; essa viene fatta coincidere con la frequenza di risonanza dei capi LC delle sezioni trasmittente e ricevente scegliendo opportunamente i valori dei condensatori. La frequenza di alimentazione è stata fissata a 40 kHz come compromesso tra il vantaggio di operare con una elevata frequenza di risonanza e la necessità di limitare le perdite di commutazione nell'invertitore. Valori più alti di frequenza consentirebbero di ridurre le autoinduttanze delle bobine a parità dei loro fattori di merito e potrebbero essere utilizzati impiegando invertitori formati da interruttori elettronici di potenza con basse perdite di commutazione (vedi paragrafo 7.1).

I dati geometrici delle bobine insieme con le prestazioni di efficienza del trasferimento di energia e del fattore di dimensionamento del generatore di tensione alternata richieste allo STEESC risonante sono elencati nella parte inferiore della Tab. 4.1.

Infine, assumendo che il raddrizzatore a diodi DR_T abbia un'efficienza del 95%, l'efficienza complessiva dell'impianto contactless risulta non inferiore al 81%. Questo valore tiene conto dell'efficienza del trasferimento di energia (imposta non inferiore al 95%) e dell'efficienza del sottosistema formato dal raddrizzatore a diodi DR_R e dal chopper (ipotizzata pari al 90%).

TAB 4.1. CARATTERISTICHE DEGLI ACCUMULATORI, DATI GEOMETRICI DELLE BOBINE E PRESTAZIONI RICHIESTE ALLO STEESC RISONANTE		
Parametro	Simbolo	Valore
Tensione minima degli accumulatori	$V_{B,m}$	36 V
Tensione massima degli accumulatori	$V_{B,M}$	56 V
Corrente nominale di ricarica degli accumulatori	I_B	10 A
Corrente di fine ricarica degli accumulatori	I_C	0.1 A
Tensione nominale di rete	V_N	230 V _{rms}
Frequenza di alimentazione dello STEESC risonante	$f=\omega/2\pi$	40 kHz
Tensione minima di uscita dell'invertitore	$V_{s,m}$	200 V _{rms}
Tensione minima in ingresso al chopper	$V_{DC,m}$	65 V
Valore minimo di R_L	$R_{L,m}$	5.8 Ω
Valore massimo di R_L	$R_{L,M}$	580 Ω
Valore di R_L all'inizio del processo di ricarica	$R_{L,cb}$	9 Ω
Massima corrente di carico	$I_{L,M}$	10 A _{rms}
Diametro delle bobine	D	0.4 m
Distanza tra le bobine	d	0.1 m
Efficienza del trasferimento di energia	η	$\geq 95\%$
Fattore di dimensionamento del generatore (equivalente) di tensione	α	≤ 1.2

5. Indagine sulla configurazione delle bobine

Si consideri Q_T uguale a 1000. Analizzando le figure 3.1 e 3.2, si ricava che le prestazioni richieste allo STEESC sono soddisfatte per Q_R maggiore di 0.5. In particolare per $Q_R=0.5$ l'efficienza del trasferimento dell'energia risulta uguale al 95% e il fattore di dimensionamento dell'invertitore a 1.12.

5.1 Dati di progetto per le bobine

Sostituendo il valore richiesto di Q_R nella (1.3), unitamente a R_L e ω , si ottiene l'autoinduttanza L_R della bobina ricevente. A causa delle variazioni di R_L durante il processo di ricarica, L_R è calcolata utilizzando la resistenza di carico massima $R_{L,M}$. Dalla condizione di risonanza in (3.2) viene quindi ricavato il valore di C_R . Dal valore specificato per l'efficienza del trasferimento di energia, dapprima si ottiene l'ampiezza in pu della corrente di carico mediante l'ultima delle (3.4) e, sostituendo ω , $I_{L,M}$ e $V_{s,m}$ nella (3.5), si risale al valore della mutua induttanza. Infine, l'autoinduttanza L_T della bobina trasmittente è ottenuta dalla (1.2) mentre C_T è ricavato dai valori di L_T e ω imponendo la condizione (3.2) di risonanza nella sezione trasmittente. I dati di progetto per i parametri induttivi delle bobine sono riassunti nella Tab. 5.1.

TAB. 5.1. DATI DI PROGETTO DELLE BOBINE	
Q_T	1000
Q_R	0.5
L_R	1.15 mH
M	72.5 μ H
L_T	114 μ H
k	0.2

5.2 Dimensionamento delle bobine

Nel dimensionamento delle bobine, il dato di progetto sull'autoinduttanza L_R è stata rilasciato selezionando per essa un valore di 362 μ H al fine di ridurne le dimensioni. Lo stesso valore di autoinduttanza è stato scelto anche per L_T , mantenendo inalterati i dati di progetto per M e k . Con questa selezione dei parametri induttivi, Q_R eccede il dato di progetto durante l'intero processo di ricarica a corrente costante e per una parte del processo di ricarica a tensione costante, parte che si estende dal suo inizio fino a che R_L diventa pari a 182 Ω e la corrente di ricarica a 0.37 A (che corrisponde a circa 1/30 della corrente nominale di ricarica degli accumulatori). Per valori di corrente inferiori a 0.37 A, le prestazioni richieste allo STEESC non sono più soddisfatte. In particolare, al termine del processo di ricarica (i.e. per una corrente di ricarica di 0.1 A), Q_R risulta uguale a 0.15 ed i corrispondenti valori dell'efficienza del trasferimento di energia e del fattore di dimensionamento del generatore di tensione diventano rispettivamente 0.86 e 1.16. Si noti che l'efficienza del trasferimento di energia è inferiore alla specifica richiesta ma questo risultato può essere accettato dal momento che, quando la corrente di ricarica scende al di sotto di 0.37 A, la maggior parte del processo di ricarica è già avvenuto.

La bobina ricevente è dimensionata per sostenere la massima corrente di carico $I_{L,M}$. Dalla seconda equazione in (2.2), la corrente nella bobina trasmittente è data da

$$I_{T,M} = \frac{R_L}{\omega M} I_{L,M} \quad (5.1)$$

ed è uguale a 3.2 A_{rms} .

Il diametro del filo delle bobine è stato determinato prendendo in considerazione l'effetto pelle. Con una densità di corrente di 5 A_{rms}/mm^2 e una profondità di conduzione di 0.3 mm, il diametro del filo risulta di

0.98 mm per la bobina trasmittente e di 2.48 mm per quella ricevente. Il numero delle spire che costituiscono ciascuna bobina è stato stimato usando la seguente equazione:

$$N = \sqrt{\frac{L}{\mu_0 \frac{D}{2} \left(\ln \left(\frac{8D}{d_w} - 2 \right) \right)}} \quad (5.2)$$

dove L è l'autoinduttanza, μ_0 è la permeabilità all'aria, D è il diametro della bobina e d_w è il diametro del filo. Applicando la (5.2), le spire N_T della bobina trasmittente e N_R della bobina ricevente sono risultate pari rispettivamente a 21 e 26.

Utilizzando queste stime come punto di partenza, il dimensionamento delle bobine di accoppiamento è stato effettuato con l'assistenza del calcolatore mediante il software agli elementi finiti COMSOL al fine di identificare la configurazione elettromagnetica che soddisfacesse i dati di progetto. Inizialmente è stata considerata per entrambe le bobine una configurazione senza nucleo magnetico; i risultati dell'elaborazione sono riportati nella prima colonna della Tab. 5.2. Essi mostrano che le autoinduttanze e la mutua induttanza corrispondono ai valori richiesti mentre il coefficiente di accoppiamento è leggermente inferiore al valore di progetto; questa discrepanza tuttavia non altera significativamente le prestazioni richieste allo STEESC risonante. Inoltre, il valore risultante di R_R conferma l'ipotesi che essa può essere trascurata rispetto a R_L . Le linee dell'induzione magnetica prodotte dalla bobina trasmittente per la configurazione esaminata sono riportate in Fig. 5.1. La figura mostra che la maggior parte delle linee non concatenano la bobina ricevente, dando origine ad un flusso disperso elevato che spiega il basso valore ottenibile per il coefficiente di accoppiamento.

TAB. 5.2. RISULTATI DEL DIMENSIONAMENTO				
	Senza nucleo	Nucleo a I	Nucleo a C	Nucleo a E
N_T	22	15	14	14
N_R	26	23	23	23
L_T	378	333	323	344
$L_R(\mu H)$	373	318	320	320
$R_T (m\Omega)$	86	68	62	62
$R_R(m\Omega)$	91	83	83	83
Q_T	1098	1267	1312	1397
$Q_R @ R_{L,m}$	16.16	13.77	13.86	13.86
$M (\mu H)$	72.4	69.0	70.1	71.9
k	0.192	0.212	0.218	0.216

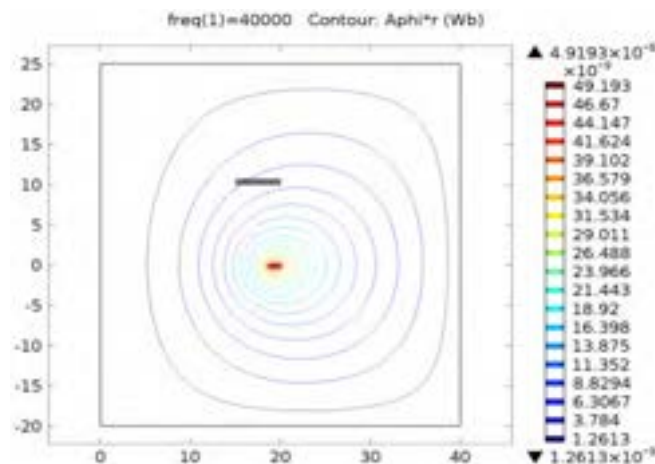


Figura. 5.1. Linee di induzione magnetica prodotte dalla bobina trasmittente senza nucleo magnetico.

Per aumentare il coefficiente di accoppiamento, è stata studiata una configurazione in cui la bobina trasmittente è posta sopra un nucleo di ferrite e per esso sono state studiate tre forme diverse: I, C ed E. L'uso della ferrite è stato preso in considerazione perché essa ha una elevata permeabilità magnetica associata ad una bassa conducibilità elettrica che mitiga le perdite per isteresi e correnti parassite prodotte dai cicli magnetici ad alta frequenza alle quali essa è sottoposta. Sezione e dimensioni dei nuclei studiati sono riportati in Fig. 5.2. Il nucleo a I è semplicemente un disco sottile su cui è appoggiata la bobina, ed è rappresentato dal rettangolo blu con motivo punteggiato. Il nucleo a C è formato dallo stesso disco di base con in più un bordo perimetrale, rappresentato dalle pareti gialle con motivo incrociato. Il nucleo a E include anche un cilindro centrale, rappresentato dal rettangolo verde con motivo a linea obliqua.

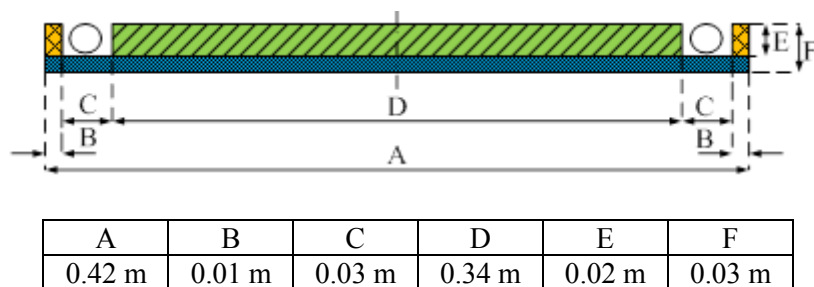


Figura. 5.2. Sezione e dimensioni dei nuclei.

Per ciascun tipo di nucleo, le bobine sono state dimensionate in modo da soddisfare le specifiche delle STEESC in termini di efficienza del trasferimento di energia e di fattore di dimensionamento del generatore di tensione, ottenendo valori leggermente diversi per i parametri induttivi delle bobine. I risultati, riportati nelle ultime tre colonne della Tab. 5.2, evidenziano che il numero di spire necessarie per ottenere le autoinduttanze richieste e il coefficiente di accoppiamento risultante sono moderatamente influenzati dalla forma del nucleo, con il numero di spire totali che si riduce di circa il 18% e il coefficiente di accoppiamento che aumenta di circa il 10%. Nel prosieguo del progetto è stato impiegato il nucleo a C, per il quale si ottiene un coefficiente di accoppiamento leggermente superiore. La Fig. 5.3 riporta le linee dell'induzione magnetica prodotte dalla bobina trasmittente munita del nucleo a C.

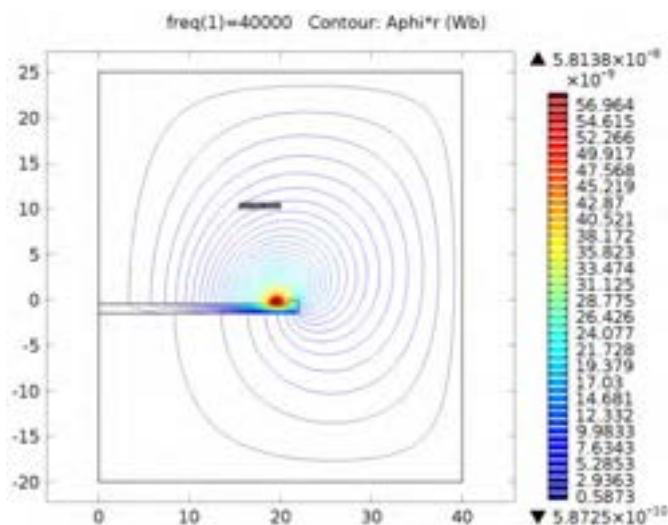


Figura. 5.3. Linee di induzione magnetica con nucleo a C.

6. Analisi numerica dello STEESC progettato

Per verificare il progetto dello STEESC risonante, è stato implementato un suo modello circuitale per mezzo del codice PSIM ed è stato analizzato il comportamento elettrico dello STEESC durante il processo di ricarica degli accumulatori. Nella stesura del modello sono state abbandonate le ipotesi semplificative adottate in fase di progettazione, come la forma d'onda sinusoidale di tensione invece che quadra o quasi-quadra all'uscita dell'invertitore (vedi cap. 7), il funzionamento ideale dei raddrizzatori a diodi, e così via. L'analisi numerica è stata condotta sia per la configurazione delle bobine senza nucleo che per quella con nucleo a C.

Il modello circuitale è stato integrato con un anello di controllo della tensione $V_{DC,R}$ del bus in continua in ingresso al chopper della sezione ricevente al fine di regolare la sua ampiezza a 65 V. Come grandezza di comando del sistema di regolazione è stata utilizzata l'ampiezza V_s della componente fondamentale di tensione generata dall'invertitore.

I valori di V_s , I_T e I_R ottenuti dall'analisi numerica per cinque diversi stati del processo di ricarica degli accumulatori sono riportati in Tab. 6.1. Gli asterischi denotano che la conduzione della corrente nella bobina ricevente è discontinua; questo comportamento avviene per i valori più piccoli della corrente di ricarica degli accumulatori. Dall'esame della tabella emerge che il comportamento elettrico dello STEESC risonante non cambia sostanzialmente passando dalla configurazione senza nucleo a quella con nucleo a C, a parte i valori leggermente inferiore della tensione V_s richiesta per mantenere costante la tensione $V_{DC,R}$, almeno fino a che la conduzione resta continua. Le ampiezze delle correnti nelle bobine trasmettente e ricevente sono in accordo con i valori attesi, dimostrando la correttezza delle ipotesi formulate in sede di progettazione dello STEESC risonante. Si noti che le ampiezze di $I_{R, \text{senza nucleo}}$ e $I_{R, \text{nucleo a C}}$ sono uguali perché la corrente di carico è determinata dal carico e non dalle configurazioni delle bobine.

TAB. 6.1. RISULTATI DELL'ANALISI NUMERICA					
V_B [V]	36	48	56	56	56
I_B [A]	10	10	10	1	0.1
$I_{T, \text{senza nucleo}}$ [A]	4.66	4.67	4.68	4.61	4.37
$I_{T, \text{nucleo a C}}$ [A]	4.81	4.82	4.83	4.62	4.47
$I_{R, \text{senza nucleo}}$ [A]	9.18	12.21	14.23	1.46	0.16*
$I_{R, \text{nucleo a C}}$ [A]	9.19	12.22	14.23	1.47	0.16*
$V_{S, \text{senza nucleo}}$ [V]	167	223	259	27.1	3.5
$V_{S, \text{nucleo a C}}$ [V]	162	216	251	26.5	3.5

7. Invertitore ad alta frequenza

Lo schema dell'invertitore ad alta frequenza è disegnato in Fig. 7.1 ed è composto di quattro interruttori elettronici di potenza con in parallelo i diodi di ricircolo. La tensione generata dall'invertitore è indicata con v_i . L'invertitore può funzionare sia in onda quadra sia in onda quasi-quadra dipendendo dalla modalità di controllo, con frequenza dell'onda uguale alla frequenza di risonanza dei capi LC dello STEESC e con ampiezza dell'onda uguale alla tensione $V_{DC,T}$ del lato in continua dell'invertitore.

L'ampiezza della componente fondamentale di tensione generata dall'invertitore può essere controllata secondo due modalità: i) controllando l'ampiezza $V_{DC,T}$ della tensione nel lato in continua dell'invertitore mediante l'inserimento di un chopper abbassatore tra il raddrizzatore a diodi DR_T e l'invertitore stesso. Con questa modalità di controllo l'invertitore genera una tensione di forma d'onda quadra, come mostrato in Fig. 7.2; gli interruttori dell'invertitore sono comandati a coppie opposte cosicché quando T_1 e T_4 sono chiusi, T_2 e T_3 sono aperti, e viceversa, ii) controllando l'invertitore con la tecnica della cancellazione di tensione al fine di inserire dei livelli di ampiezza zero nella tensione generata da esso. Con questa modalità di controllo l'invertitore genera una tensione di forma d'onda quasi-quadra, come mostrato in Fig. 7.2; gli interruttori dell'invertitore sono comandati a coppie opposte, come nel caso precedente, per una parte del

periodo e a coppie allineate per la restante parte del periodo cosicché possono essere chiusi contemporaneamente T_1 e T_2 mentre T_3 e T_4 sono aperti o viceversa.

Oltre alla componente fondamentale, la tensione v_i generata dall'invertitore presenta anche armoniche dispari, aventi ampiezza inversamente proporzionale al loro ordine di armonica. L'impedenza vista dall'invertitore nel lato in alternata ha modulo minimo in corrispondenza della frequenza di risonanza e poi crescente per frequenze maggiori o minori di essa. Le armoniche di corrente risultano quindi attenuate rispetto alla fondamentale in misura tale da poter considerare sinusoidale la corrente nello stadio di trasferimento dell'energia nonostante la tensione applicata allo stadio abbia forma d'onda quadra o quasi-quadra. Di conseguenza solo la componente fondamentale della tensione generata dall'invertitore è utile ai fini dell'analisi del comportamento dello stadio e l'invertitore può essere assimilato ad un generatore di tensione sinusoidale pari alla componente fondamentale della tensione generata da esso.

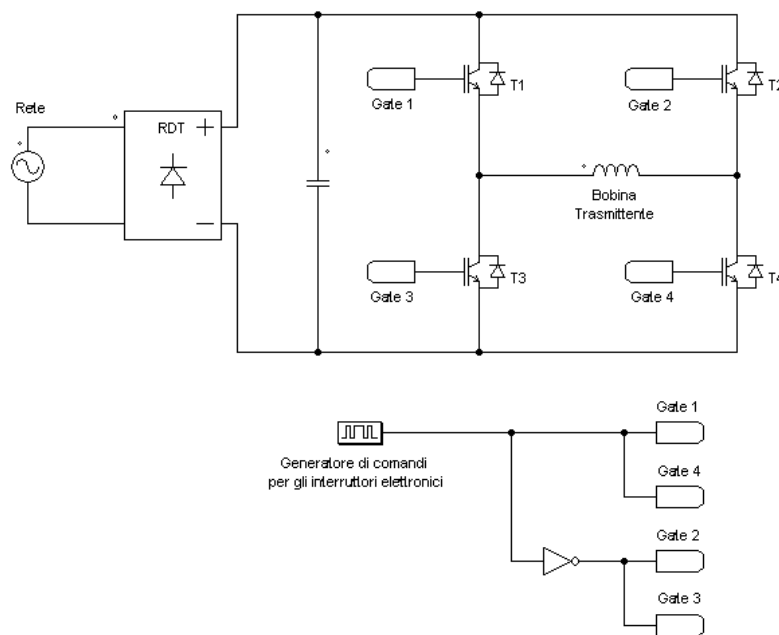


Figura 7.1. Schema di principio dell'invertitore.

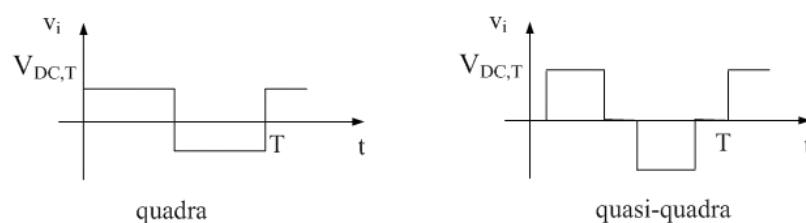


Figura 7.2. Forma d'onda quadra e quasi quadra.

Alla frequenza di risonanza il carico visto dall'invertitore è puramente resistivo e la corrente risulta in fase con la componente fondamentale di tensione generata dall'invertitore. Ne consegue che, nel funzionamento in onda quadra, le commutazioni degli interruttori avvengono in corrispondenza dei passaggi per lo zero della corrente (soft-switching) cosicché le perdite di commutazione degli interruttori sono nulle e l'efficienza del trasferimento di energia è maggiore. Invece, nel funzionamento in onda quasi-quadra, le commutazioni degli interruttori sono affette da perdite perché avvengono con corrente non nulla.

7.1 Scelta degli interruttori elettronici di potenza

Il raddrizzatore a diodi RD_T sia alimentato da una rete monofase a 230 V. La tensione in uscita da RD_T ha un valore massimo di 358 V ($230 \text{ V} \times \sqrt{2} \times 1,1$, essendo pari al 10% le fluttuazioni in eccesso ammesse per la tensione di rete). Pertanto per la realizzazione dell'invertitore possono essere impiegati interruttori elettronici di potenza progettati per sopportare tensione fino a 600 V. Viste la corrente relativamente bassa assorbita dalla bobina trasmittente, l'impiego di interruttori con correnti di lavoro di circa $10 \text{ A}_{\text{rms}}$ dovrebbe garantire un ragionevole margine di sicurezza.

E' necessario invece selezionare interruttori elettronici di potenza in grado di assicurare piccoli tempi di commutazione, compatibili con la frequenza di lavoro prevista che è notevolmente superiore a quella comunemente adottata per le applicazioni industriali di conversione statica di potenza. Piccoli tempi di commutazione garantiscono anche basse perdite durante le commutazioni. A tal proposito, si rileva che negli ultimi anni sono apparsi sul mercato interruttori elettronici di potenza che utilizzano il nitruro di gallio (GaN) e il carburo di silicio (SiC) al posto del silicio, per realizzare transistori di tipo MOSFET e diodi. I due composti si comportano come un materiale semiconduttore che, rispetto al silicio, presenta valori maggiori i) per la banda proibita di energia compresa tra la banda di valenza e quella di conduzione, ii) per la mobilità delle cariche, iii) per la velocità di saturazione delle cariche. Oltre a ridurre i tempi di commutazione, queste proprietà conferiscono agli interruttori elettronici di potenza realizzati con GaN e SiC la capacità di i) funzionare ad elevate temperature, ii) sopportare elevate tensioni di scarica, iii) essere affetti da basse cadute di tensione nello stato di ON. In sede di realizzazione dell'invertitore e del raddrizzatore a diodi DR_R si ritiene pertanto utile valutare la convenienza di impiegare interruttori elettronici di potenza in GaN e SiC.

8. Specifiche tecniche dell'impianto di ricarica contactless

In questo capitolo si riassumono i risultati ottenuti nei capitoli precedenti e si forniscono le specifiche tecniche per i componenti dei sottosistemi di potenza che formano l'impianto di ricarica contactless. Lo schema circuitale dello STEESC progettato, ricavato dalle Figg. 1.1 e 3.1, è disegnato in Fig. 8.1.

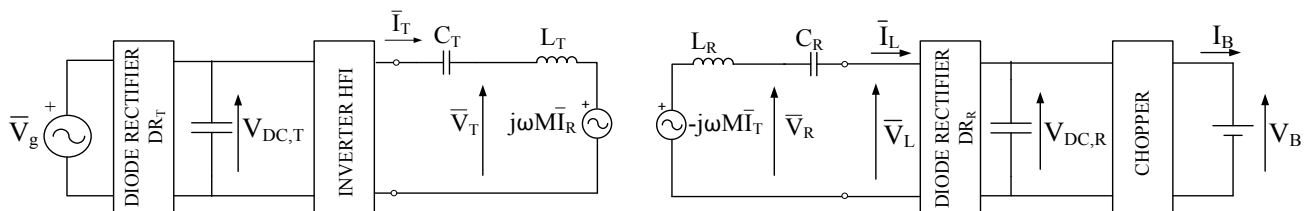


Figura 8.1. Schema circuitale dello STEESC progettato.

8.1 Sottosistemi di potenza

Lo STEESC progettato è formato da alcuni sottosistemi di potenza. Essi sono il raddrizzatore a diodi DR_T e il relativo filtro di uscita capacitivo, l'invertitore in alta frequenza, lo stadio di trasferimento dell'energia e il raddrizzatore a diodi DR_R con il relativo filtro di uscita capacitivo, oltre al chopper abbassatore che alimenta gli accumulatori in modo controllato.

8.2 Descrizione funzionale

Il raddrizzatore a diodi DR_T è alimentato da rete e fornisce una tensione pressoché costante all'ingresso dell'invertitore. L'invertitore genera una tensione quasi quadra: la frequenza della tensione è tenuta fissa mentre l'ampiezza della componente fondamentale varia in rapporto alle condizioni di lavoro. La bobina

trasmittente induce una tensione ai capi della bobina ricevente. Tale tensione è raddrizzata dal raddrizzatore a diodi DR_R e alimenta il chopper abbassatore. Il chopper controlla il processo di carica degli accumulatori mantenendo la corrente di carica costante e pari alla nominale fino a quando la tensione degli accumulatori raggiunge il valore massimo e applicando successivamente una tensione di carica costante e pari al valore massimo della tensione sugli accumulatori fino a quando la corrente degli accumulatori scende al valore di fine carica.

8.3 Specifiche dei componenti di potenza

Le seguenti specifiche in termini di tensione e corrente dei componenti di potenza sono state calcolate considerando il funzionamento dello STEESC risonante con tensione di rete nominale e con corrente di carica della batteria variabile tra il valore nominale e 1/30 di esso. La scelta dei limiti di tensione/corrente dei componenti deve pertanto essere effettuata tenendo conto di margini di sicurezza.

Raddrizzatore a diodi della sezione trasmittente e relativo filtro capacitivo

Configurazione	monofase
Corrente efficace nei diodi	7.5 A _{rms}
Corrente di picco nei diodi	33 A
Tensione massima sui diodi	325 V
Capacità del condensatore di filtro	1m F
Tensione sul condensatore di filtro	325 V
Corrente efficace nel condensatore di filtro	6.8 A _{rms}
Corrente di picco nel condensatore di filtro	33 A

Invertitore

Frequenza di lavoro	40 kHz
Tensione ai capi degli interruttori elettronici	325 V
Corrente di picco negli interruttori elettronici	4.8 A
Corrente efficace negli interruttori elettronici	2.4 A _{rms}

Bobina Trasmittente

Induttanza	378 μ H
Corrente nominale	3.4 A _{rms}
Tensione massima	480 V
Fattore di merito a 40kHz	>1000

Condensatore di compensazione della bobina trasmittente

Capacità	41.9 nF
Corrente nominale	3.4 A _{rms}
Tensione massima	480 V

Bobina Ricevente

Induttanza	373 μ H
Corrente nominale	11 A _{rms}
Tensione massima	1370 V
Fattore di merito a 40kHz	>1000

Condensatore di compensazione della bobina ricevente

Capacità	42.4 nF
Corrente nominale	11 A _{rms}
Tensione massima	1370 V

Raddrizzatore a diodi della sezione ricevente e relativo filtro capacitivo

Configurazione	monofase
Corrente efficace nei diodi	7.5 A _{rms}
Corrente di picco nei diodi	15 A
Tensione massima sui diodi	65 V
Capacità del condensatore di filtro	10 µF
Tensione massima sul condensatore di filtro	65V
Corrente efficace nel condensatore di filtro	4.5 A _{rms}
Corrente di picco nel condensatore di filtro	9A

9. Conclusioni

Il documento ha illustrato i principi di base del funzionamento degli STEESC induttivi e risonanti, definendo figure di merito che ne esprimono le prestazioni in forma sintetica e approfondendo le caratteristiche degli STEESC risonanti con topologia serie-serie. E' stata quindi presentata la procedura per il dimensionamento dei componenti di uno STEESC risonante destinato a ricaricare gli accumulatori di una city car. E' stata valutata l'opportunità di porre la bobina trasmittente su un nucleo di ferrite per aumentare il coefficiente di accoppiamento con la bobina ricevente e, per questo scopo, è stato utilizzato un codice di analisi agli elementi finiti mediante il quale sono state indagate alcune configurazioni ottenute impiegando nuclei di forma diversa. Il funzionamento dello STEESC risonante oggetto di studio è stato infine esaminato per via numerica utilizzando un software per la simulazione circuitale. I valori ottenuti dall'esame per via numerica hanno confermato i risultati ottenuti in sede di progetto, confermando la validità delle scelte progettuali effettuate. Infine sono state fornite le specifiche tecniche dell'impianto progettato per la ricarica contactless degli accumulatori della city car.

Appendice

L'impianto di ricarica contactless è stato dimensionato per effettuare la ricarica degli accumulatori della city car elettrica mostrata in Fig. 9.1. Si tratta di un veicolo di serie a due posti. Esso è alimentato da un accumulatore a 48 V formato da 4 moduli da 12 V, 100A·h connessi in serie. La propulsione è affidata a due motori ruota inseriti nelle ruote posteriori. Essi sono del tipo sincrono a magneti permanenti con forza controelettromotrice trapezoidale e ognuno è capace di sviluppare una potenza massima di 4 kW. La velocità massima del veicolo è di 50 km/h e l'autonomia è di circa 50 km.

Per gli accumulatori è stata presa in considerazione una ricarica lenta a 10 A. La potenza assorbita dagli accumulatori alla tensione massima di carica è di 560 W.



Figura 9.1. City car elettrica.

Nella Fig. 9.2 è mostrato una possibile dislocazione a terra e a bordo veicolo dei sottosistemi dell'impianto di ricarica contactless.

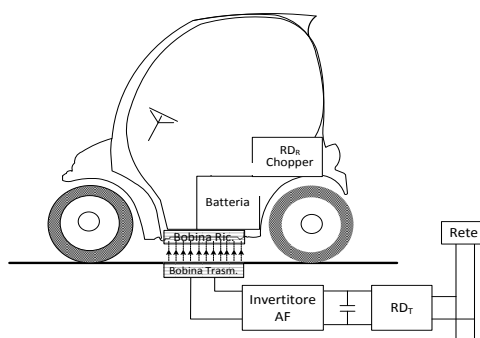


Figura 9.2. Dislocazione dei sottosistemi dell'impianto di ricarica contactless.

Acronimi e simboli

α	Fattore di dimensionamento del generatore di tensione alternata
β	Fattore di dimensionamento della bobina ricevente
η	Efficienza del trasferimento di energia
ω	Pulsazione di funzionamento
DR_R	Raddrizzatore a diodi della sezione ricevente
DR_T	Raddrizzatore a diodi della sezione trasmittente
HFI	Invertitore ad alta frequenza
$\bar{I}_L$	Corrente nel carico
$I_{L,pu}$	Ampiezza della corrente di carico in pu
$\bar{I}_R$	Corrente nella bobina ricevente
$\bar{I}_S$	Corrente nel generatore di tensione sinusoidale
$\bar{I}_T$	Corrente nella bobina trasmittente
k	Coefficiente di accoppiamento
L_R	Induttanza della bobina ricevente
L_T	Induttanza della bobina trasmittente
M	Mutua induttanza
pu	Per unità
Q_R	Fattore di qualità della bobina ricevente
Q_T	Fattore di qualità della bobina trasmittente
R_L	Resistenza equivalente di carico
R_o	Resistenza di carico riportata all'ingresso del RD_R
R_R	Resistenza della bobina ricevente
R_S	Resistenza interna del generatore di tensione sinusoidale
R_T	Resistenza della bobina trasmittente
STEESC	Sistema di Trasferimento dell'Energia Elettrica Senza Contatto
VE	Veicolo/i elettrico/i
v_i	Tensione generata dall'invertitore
$\bar{V}_R$	Tensione sulla bobina ricevente
$\bar{V}_S$	Tensione del generatore di tensione sinusoidale
$\bar{V}_T$	Tensione sulla bobina trasmittente
$\bar{V}_L$	Tensione sul carico
$\dot{Z}_R$	Impedenza della sezione ricevente
$\dot{Z}_T$	Impedenza della sezione trasmittente