

مدل عدم هم‌ترازی سیم‌پیچ در سیستم انتقال توان بی‌سیم در ایستگاه شارژ خودرو برقی

محمد رضا علیزاده پهلوانی^{۱*}، ایمان سلطانی^۲

۱- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۵/۰۸/۲۵، پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۲)

چکیده: امروزه جایگزینی خودروهای بنزین‌سوز با خودروهای برقی و اتصال آن‌ها به منبع انرژی الکتریکی، باعث شده است تا برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از این منبع ذخیره‌ساز انرژی، بیش از پیش احساس شود. لذا شارژ باتری این‌گونه خودروها امری ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مقاله بهینه‌سازی بازده سامانه انتقال توان بی‌سیم القایی، برای شارژ خودروهای الکتریکی ارائه شده است. در این سامانه معمولاً سیم‌پیچ گیرنده انرژی به‌صورت انتقالی و وضعی با سیم‌پیچ فرستنده، عدم هم‌ترازی دارد که این عدم هم‌ترازی در بازده انتقال تاثیرگذار است. از این‌رو، در این مقاله اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ فرستنده و گیرنده در شرایط مختلف فیزیکی با روش عددی گوس سه نقطه‌ای تعمیم‌یافته ارائه شده و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که یک راه‌حل بهینه نسبی برای حالت‌های عدم هم‌ترازی انتقالی و وضعی جهت بیشینه نمودن انتقال توان به بار وجود دارد و هرچه اندوکتانس متقابل بزرگ‌تر باشد، بازده انتقال توان نیز بیش‌تر خواهد بود. نشان داده می‌شود که تغییر وضعی در شرایط عدم هم‌ترازی انتقالی، می‌تواند بازده انتقال را بیشینه نماید.

کلید واژه‌ها: اندوکتانس متقابل، انتقال توان بی‌سیم، عدم هم‌ترازی، گوس سه نقطه‌ای تعمیم‌یافته.

۱- مقدمه

با پیشرفت تجهیزات سیار از قبیل خودروهای برقی و تجهیزات قابل حمل، فن‌آوری انتقال توان بی‌سیم برای شارژ نیز با اهمیت‌تر شده است [۱-۳]. به‌طورکلی، انتقال توان بی‌سیم را می‌توان یک فرآیند سه‌مرحله‌ای در نظر گرفت: ۱- تولید توان الکترومغناطیسی از جریان مستقیم یا متناوب مثلاً ۵۰ Hz، ۲- انتقال توان امواج الکترومغناطیسی به نقاط دوردست از طریق فضای آزاد و ۳- جمع‌آوری و تبدیل دوباره امواج الکترومغناطیسی به توان جریان مستقیم یا متناوب مثلاً ۵۰ هرتز در سمت گیرنده. بازده کل انتقال توان بی‌سیم برابر حاصل‌ضرب بازده مراحل سه‌گانه فوق است. در این حوزه نخستین آزمایش‌ها توسط هرتز انجام شد و توسط تسلا گسترش یافت و تلاش‌ها جهت عملکرد سیستم‌های انتقال توان بی‌سیم تا به امروز ادامه دارد [۴]. این مقاله به بررسی مرحله دوم که نقشی تعیین‌کننده در بازده کل سیستم دارد، می‌پردازد. دو سیم‌پیچ در فرکانس رزونانس^۱ می‌تواند توان را از سیم‌پیچ فرستنده (اولیه) Tx، به سیم‌پیچ گیرنده (ثانویه) Rx، با هدف تغییر میدان مغناطیسی انتقال دهد [۵]. در کاربردهای پیش‌بینی‌شده از قبیل ماشین‌های برقی و وسایل پزشکی و صنایع هوایی معمولاً سیم‌پیچ گیرنده هم از

لحاظ انتقالی و هم از لحاظ وضعی با سیم‌پیچ فرستنده عدم هم‌ترازی دارد [۶] و تأثیر این عدم هم‌ترازی بر روی بازده انتقال توان، کم‌تر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. روش‌های انتقال انرژی بی‌سیم در فواصل کوتاه را می‌توان به دو دسته القاء و رزونانس تقسیم نمود. یک ترانسفورماتور نمونه خوبی برای انتقال انرژی به روش القاء است. اگرچه سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه به هم متصل نیستند اما به دلیل القای الکترومغناطیسی، تبادل انرژی بین آن‌دو صورت می‌گیرد. ضعف بزرگ این روش لزوم نزدیک بودن گیرنده و فرستنده به هم می‌باشد. برای این‌که القاء به‌صورت موثر صورت پذیرد باید گیرنده بسیار نزدیک به فرستنده باشد. برای رفع این نقص از پدیده رزونانس کمک گرفته می‌شود. گروه تحقیقاتی در دانشگاه MIT با استفاده از رزونانس مغناطیسی، انرژی را تا فواصل چند برابر ابعاد فرستنده و گیرنده منتقل کرده‌اند [۷]. در طرح ارائه‌شده توسط این گروه، سیم‌پیچ فرستنده که به منبع متصل است، میدان مغناطیسی غیرتشنعی در فرکانس مگاهرتز ایجاد می‌کند. سیم‌پیچ گیرنده طوری طراحی شده است که با میدان حاصل از سیم‌پیچ فرستنده رزونانس کند و بدین ترتیب انرژی بین دو سیم‌پیچ مبادله می‌شود. در رزونانس کامل، این روش از بازده خوبی برخوردار است. هدف این مقاله بهینه‌سازی بازده سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی جهت شارژ خودروهای الکتریکی می‌باشد، لذا روابط تحلیلی اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ با وجود عدم هم‌ترازی ارائه شده است. نشان

* نویسنده پاسخگو: mr_alizadehp@mut.ac.ir

بهره‌برداری کارآمدتر از تجهیزات شبکه، (۶) افزایش سطح رقابت در بازارها، (۷) افزایش منابع تامین‌کننده رزرو، (۸) افزایش منابع تامین‌کننده تنظیم فرکانس، (۹) صرفه اقتصادی مالکین V2G، (۱۰) پیشگیری از جهش قیمت بازار برق، (۱۱) کاهش عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر، (۱۲) به تعویق انداختن نیاز به توسعه تولید و انتقال، (۱۳) مصرف سوخت و (۱۴) آلودگی زیست محیطی کم‌تر.

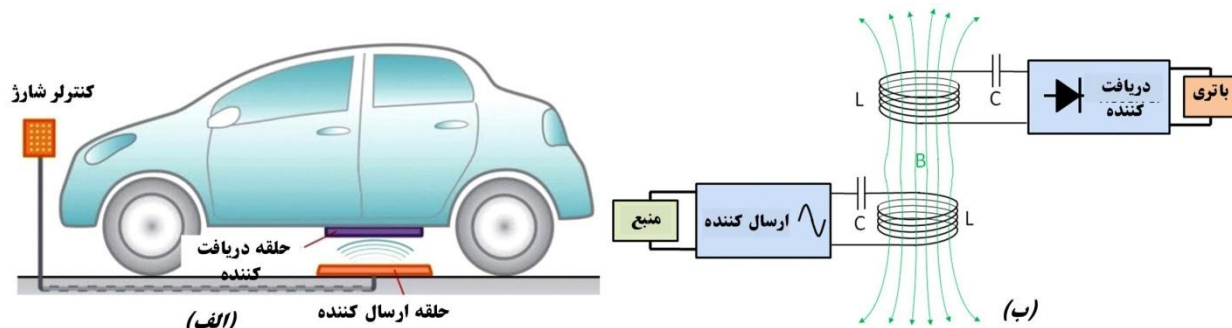
استفاده از ریل جریان و جاروبک یکی از روش‌های مرسوم جهت انتقال انرژی به وسایل نقلیه در مسیرهای طولانی (انتقال از طریق کابل در مسیرهای کوتاه) با کاربری در بالا برها، انتقال‌دهنده‌های اجسام در سطح، آسانسورها، خودرو الکتریکی و منوریل است. انتقال توان بی‌سیم القایی که براساس القای الکترومغناطیسی می‌باشد روش جدیدی برای این کاربردها است. در شکل (۱)، شمایی از این روش را نشان می‌دهد. در جدول (۱)، مقایسه‌ای بین روش‌های انتقال انرژی صورت گرفته شده است. براساس جدول (۱) مزایای WPT^۲ عبارتند از: هزینه کم نگهداری به علت عدم سایش قطعات، عدم حساسیت به شرایط محیطی، قابلیت اطمینان بالا، عایق کامل الکتریکی، عدم آلودگی زیست محیطی، ایمن بودن در شرایط جوی مختلف و هزینه بالای باتری‌های پر ظرفیت در قیاس با کاهش دوره تناوب شارژ [۱۰].

داده می‌شود که تغییر وضعی در شرایط عدم هم‌ترازی انتقالی، می‌تواند بازده انتقال را بیشینه نماید. همچنین نشان داده می‌شود با طراحی بهینه سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده نیز مقدار بازده بهبود می‌دهد. در بخش دوم مزایای خودروهای الکتریکی و در سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی ارائه شده است. در بخش سوم مدار معادل این سیستم‌ها، استخراج می‌گردد. در بخش چهارم، تحلیل عملکرد سیستم پیشنهادی در شرایط مختلف فیزیکی با تدوین روابط تحلیلی اندوکتانس متقابل صورت می‌پذیرد و همچنین نتایج شبیه‌سازی جهت شناسایی مکان هندسی بازده بهینه با بیشینه نمودن اندوکتانس متقابل ارائه می‌گردد.

۲- شارژ خودرو الکتریکی

خودرو الکتریکی، خودروهایی هستند که در آن‌ها رانش توسط انرژی الکتریکی صورت می‌پذیرد. با گسترش شبکه‌های هوشمند و تقویت زیرساخت‌های ارتباطی دوطرفه بین شبکه و مشترک، مفهوم جدیدی تحت عنوان خودرو به شبکه (V2G)^۱ شکل گرفته است [۸]. V2G یکی از عناصر مهم شبکه هوشمند می‌باشد. از مزایای فنی آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۹]:

(۱) کاهش حداکثر تولید، (۲) افزایش ضریب بار، (۳) افزایش قابلیت اطمینان، (۴) کاهش تلفات انتقال و توزیع، (۵)



شکل (۱): شمایی از شارژ بدون سیم خودرو الکتریکی (ب) نمایی از سیستم انتقال توان القایی

جدول (۱): مقایسه روش‌های مختلف انتقال انرژی [۱۳]

شاخص	انتقال توان القایی	انتقال کابلی	انتقال ریل جریان و جاروبک	شاخص	انتقال توان القایی	انتقال کابلی	انتقال ریل جریان و جاروبک
قابلیت اطمینان	بالا	متوسط	متوسط	تکنولوژی	بسیار پیچیده	ساده	پیچیده
حساسیت به محیط	خیر	خیر	حساس به یخ‌زدگی و گرد و خاک	ولتاژ و جریان	AC و DC	AC و DC	فرکانس پایین
امنیت در مقابل برق‌گرفتگی	امن	امن	خطرناک	تعداد فاز	یک	یک و سه	یک و سه
اغتشاش الکترومغناطیسی	متوسط	کم	کم	تبدیل توان	بله	خیر	خیر
آلودگی	بی‌تاثیر	بی‌تاثیر	موثر در جاروبک‌ها	بازده	کم	زیاد	متوسط
برآورد هزینه	زیاد	کم	متوسط	ساییدگی یا پارگی	خیر	بله	بله
هزینه نصب/ بهره‌برداری	زیاد/کم	کم/کم	متوسط	تعمیر نگهداری	خیر	بله	بله

انتقال بیش‌تر خواهد بود. با مشتق‌گرفتن از P_{out} نسبت به M (رابطه ۲) می‌توان طراحی بهینه سیم‌پیچ اولیه و ثانویه را انجام داد.

$$\frac{\partial P_{out}}{\partial M} = \frac{\partial}{\partial M} \left(\frac{u_{in}^2 (\omega M)^2 R_L}{[R_p(R_S + R_L) + (\omega M)^2]^2} \right) = 0 \quad (4)$$

لذا داریم:

$$M = \sqrt{\frac{R_p(R_S + R_L)}{(\omega)^2}} \quad (5)$$

در رابطه (۵) مقادیر R_L و ω ثابت هستند و با داشتن مقدار اندوکتانس متقابل بیشینه می‌توان مقدار بهینه R_p, R_S را جهت انتقال حداکثر توان به بار از طریق سیم‌پیچ‌ها ثانویه را محاسبه نمود.

۴- عدم هم‌ترازی و تحلیل اندوکتانس متقابل

عدم هم‌ترازی انتقالی و وضعی یک مسئله اساسی در طراحی سیستم‌های انتقال توان بی‌سیم القایی است. در کاربردهای عملی، عدم هم‌ترازی سیم‌پیچ‌ها، معمول می‌باشد و این عدم هم‌ترازی به سه صورت زیر می‌تواند باشد: (الف) عدم هم‌ترازی انتقالی، در این حالت هر دو سیم‌پیچ در صفحات موازی باهم با فاصله d قرار دارند، ولی مرکزهای این دو سیم‌پیچ در راستا یک یا دو محور از هم فاصله دارند (شکل ۳- الف). (ب) عدم هم‌ترازی وضعی، در این حالت، صفحه سیم‌پیچ T_x به‌اندازه θ حول محور y دوران نموده و مرکزهای این دو سیم‌پیچ در راستا محور z با فاصله d قرار دارند (شکل ۳- ب). (پ) عدم هم‌ترازی ترکیبی: در این حالت هر دو نوع عدم هم‌ترازی انتقالی و وضعی با هم ترکیب شده است (شکل ۳- ج) و (شکل ۳- د). اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ M ، مطابق شکل (۳) به‌کمک رابطه نیومن به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$M = \frac{N_{Tx} N_{Rx} \mu_0}{4\pi} \oint_{I_{Tx}} \oint_{I_{Rx}} \frac{dl_{Tx} \cdot dl_{Rx}}{R} \quad (6)$$

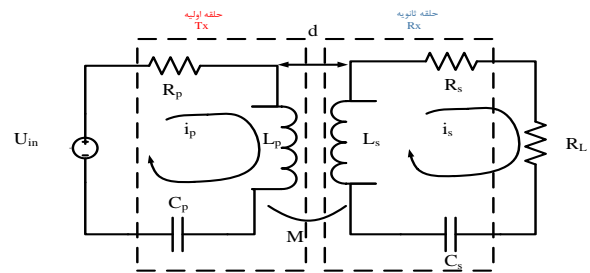
که در آن، $N_{Tx}, N_{Rx}, dl_{Tx}, dl_{Rx}$ به‌ترتیب تعداد دور سیم‌پیچ‌ها و نمو طولی یک حلقه سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه را نشان می‌دهند. R نیز فاصله بین dl_{Tx} و dl_{Rx} از دو حلقه و μ_0 نیز ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلأ است. همچنین R_{Tx} و R_{Rx} شعاع سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده است. با توجه به رابطه (۶) استنباط می‌گردد که اندوکتانس متقابل به نحوه قرارگیری دو سیم‌پیچ وابسته است. اگر مختصات المان طولی سیم‌پیچ فرستنده با $O_1(x_1, y_1, z_1)$ و سیم‌پیچ گیرنده با $O_2(x_2, y_2, z_2)$ بیان شود داریم:

$$x_1 = R_{Tx} \cos \phi_1 \quad (7)$$

$$y_1 = R_{Tx} \sin \phi_1 \cos \theta \quad (8)$$

۳- مدل سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی

سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی در اصل شبیه ترانسفورماتور بدون هسته است که اولیه آن به منبع تغذیه و ثانویه آن به بار متصل است. در این سیستم فاصله هوایی نقش هسته را بازی می‌نماید. شاری تولیدی ناشی از عبور جریان در سیم‌پیچ اولیه اگر از سیم‌پیچ ثانویه عبور نماید سبب القاء ولتاژ در سیم‌پیچ ثانویه می‌گردد. در صورت اتصال ثانویه به بار، در سیم‌پیچ ثانویه جریان برقرار می‌گردد. مدار معادل سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی در شکل (۲) نشان داده شده است [۵-۶]. در این شکل، d فاصله بین دو سیم‌پیچ، M اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ، U_{in} منبع ولتاژ ورودی است. مقادیر $R_p, R_S, C_p, C_S, L_p, L_S$ پارامتری مقاومت، ظرفیت خازنی و اندوکتانس‌های خودی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه در فرکانس HF می‌باشند. R_L نیز مقدار مقاومت بار می‌باشد [۱۶-۱۴].



شکل (۲): مدل سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی

اگر فرکانس عملکرد سیستم ω باشد، از KVL برای سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه را با توجه به شکل (۳) داریم:

$$\begin{bmatrix} U_{in} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p + jX_p & j\omega M \\ j\omega M & R_S + R_L + jX_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$X_p = \omega L_p - 1/(\omega C_p)$$

$$X_s = \omega L_s - 1/(\omega C_s)$$

بازده توان انتقال‌یافته، با توجه به نسبت توان خروجی P_{out} به بار R_L به توان ورودی P_{in} در سیم‌پیچ اولیه عبارتند از:

$$P_{in} = \frac{u_{in}^2 Z_S}{Z_p Z_S + (\omega M)^2}$$

$$P_{out} = \frac{u_{in}^2 (\omega M)^2 R_L}{[Z_p Z_S + (\omega M)^2]^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(\omega M)^2 R_L}{Z_S [Z_p Z_S + (\omega M)^2]} 100 \quad [\%]$$

با وقوع رزونانس در دو سیم‌پیچ، بیش‌ترین توان به بار R_L انتقال می‌یابد، لذا در این شرایط داریم:

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_S + R_L)[R_p(R_S + R_L) + (\omega M)^2]} 100 \quad [\%] \quad (3)$$

از رابطه (۳) می‌توان تأثیر اندوکتانس متقابل را بر روی بازده انتقال به‌وضوح مشاهده کرد و هرچه این مقدار بیش‌تر باشد بازده

$$dl_{Rx} = -R_{Rx} \sin \phi_2 d\phi_2 \vec{a}_{x2} + R_{Rx} \cos \phi_2 d\phi_2 \vec{a}_{y2} \quad (۱۵)$$

حل تحلیلی معادله (۶) در حالت‌های عدم هم‌ترازی سیم‌پیچ‌ها به دلیل وجود انتگرال‌های دوگانه به صورت فرم بسته ممکن نبوده و با راه‌حل‌های عددی از قبیل گوس سه نقطه‌ای تعمیم‌یافته در این مقاله ارائه شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی اندوکتانس متقابل در حالت‌های عدم هم‌ترازی مختلف براساس مشخصات دو سیم‌پیچ ذکر شده در جدول (۲) ارائه شده است.

$$z_1 = R_{Tx} \sin \phi_1 \sin \theta \quad (۹)$$

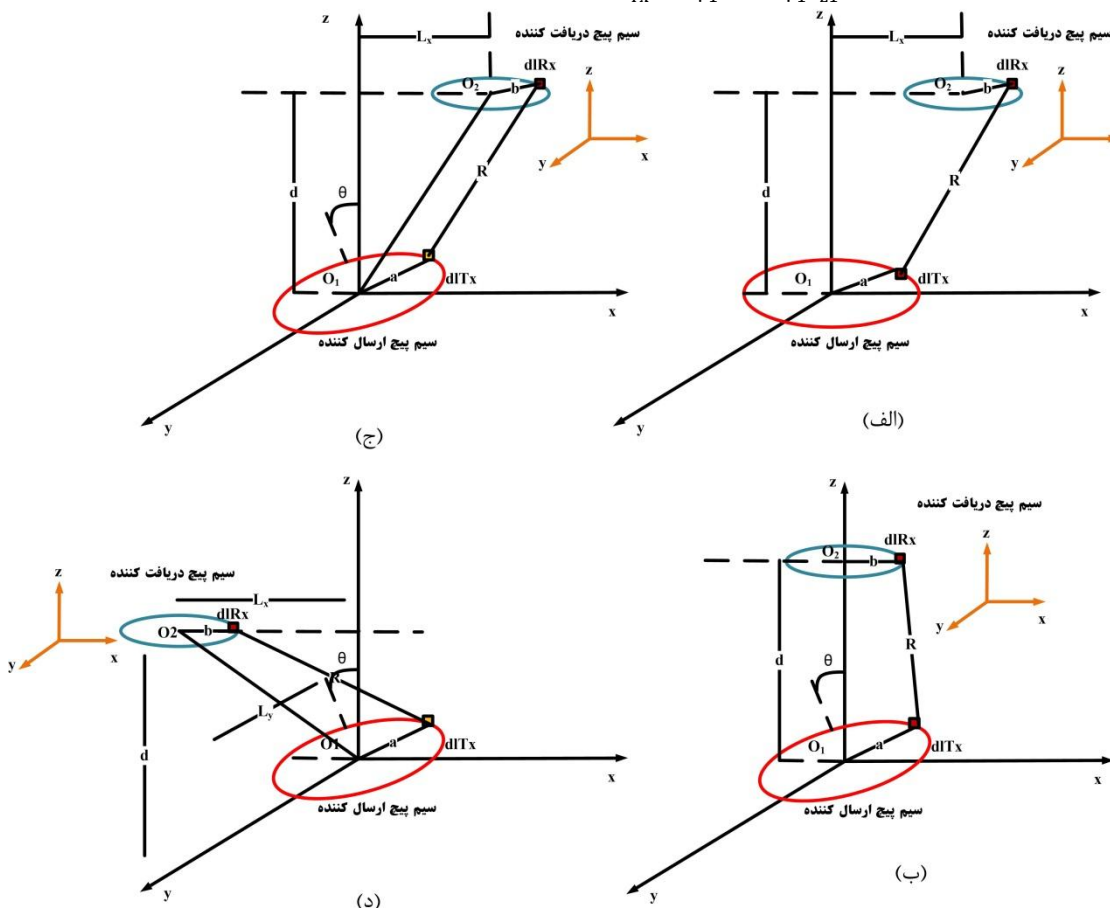
$$x_2 = L_x + R_{Rx} \cos \phi_2 \quad (۱۰)$$

$$y_2 = L_y + R_{Rx} \sin \phi_2 \quad (۱۱)$$

$$z_2 = d \quad (۱۲)$$

$$R = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (۱۳)$$

$$dl_{Tx} = -R_{Tx} \sin \phi_1 d\phi_1 \vec{a}_{x1} + R_{Tx} \cos \phi_1 \cos \theta d\phi_1 \vec{a}_{y1} + R_{Tx} \cos \phi_1 \sin \theta d\phi_1 \vec{a}_{z1} \quad (۱۴)$$



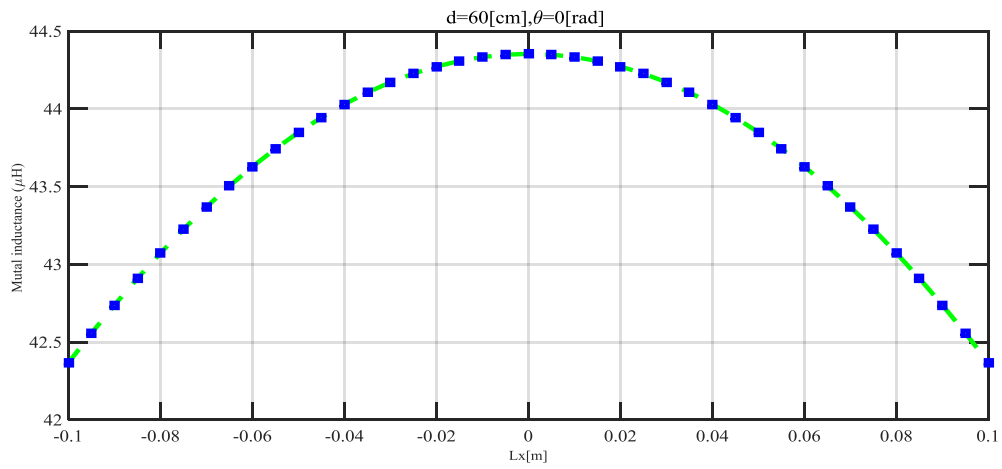
شکل (۳): پیکربندی عدم هم‌ترازی سیم‌پیچ‌های فرستنده (Tx) و گیرنده (Rx).

دارای بیش‌ترین مقدار است و با افزایش فاصله مراکز سیم‌پیچ‌ها در راستای محور x و یا محور y مقدار اندوکتانس متقابل کاهش می‌یابد. در شکل‌های (۱۰-۷) مقدار اندوکتانس متقابل با عدم هم‌ترازی ترکیبی نشان داده شده است. همانگونه که انتظار می‌رفت تقارن اندوکتانس متقابل در شکل (۷) نسبت به زاویه دوران و L_x و عدم تقارن نسبت به زاویه دوران و L_y معیار درستی جهت اعتبارسنجی این شبیه‌سازی‌ها است. همچنین مکان هندسی اندوکتانس متقابل معین در این شکل به‌ازاء L_x ، L_y و θ می‌تواند در بیشینه نمودن توان انتقالی به بار (سیم‌پیچ گیرنده خودرو الکتریکی) استفاده گردد. از این دو شکل مشاهده می‌شود که افزایش d سبب کاهش محدوده اندوکتانس متقابل معین می‌گردد.

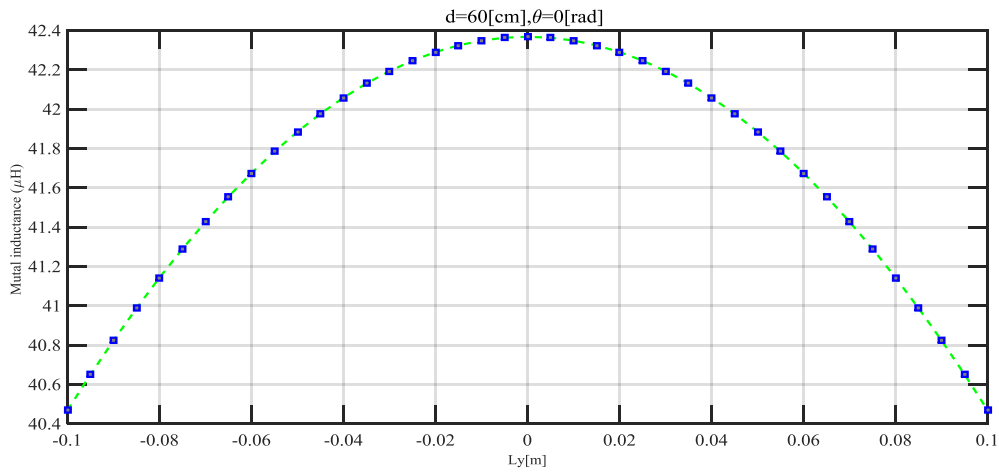
جدول (۲): مشخصات سیم‌پیچ‌ها [۱۶]

$R_{Tx} = 0.3 [m]$	شعاع سیم‌پیچ‌ها
$R_{Rx} = 0.2 [m]$	
$R_s = 1 [\Omega]$	مقاومت سیم‌پیچ‌ها
$R_p = 1 [\Omega]$	
$N_{Tx} = 13$	تعداد دور سیم‌پیچ‌ها
$N_{Rx} = 16$	
$f = 0.56 [MHz]$	فرکانس رزونانس
$R_L = 1.44 [\Omega]$	مقاومت بار
$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [H/m]$	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلا

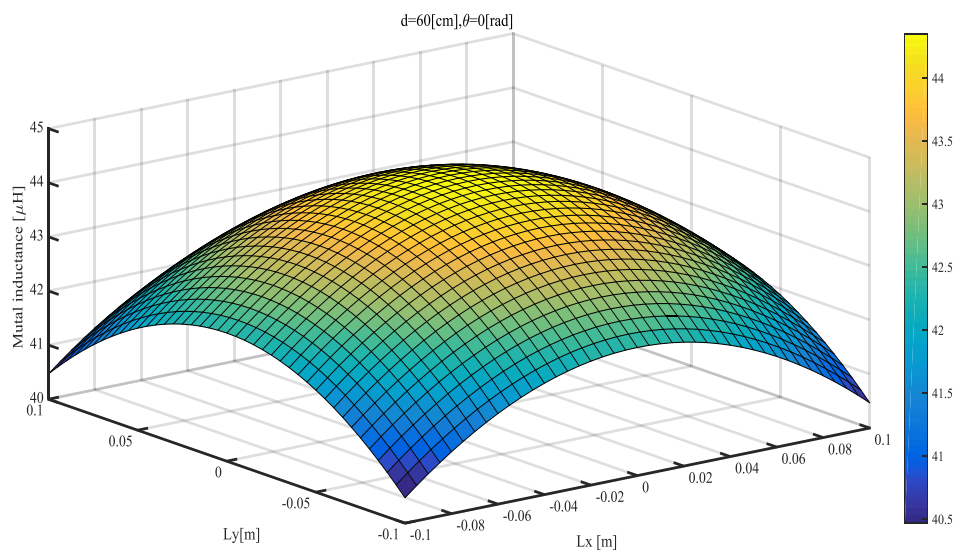
در شکل‌های (۴-۶) مقدار اندوکتانس متقابل با عدم هم‌ترازی انتقالی نشان داده شده است، همان‌طور که از این شکل‌ها استنباط می‌شود مقدار اندوکتانس متقابل به‌ازاء $L_x = L_y = 0$



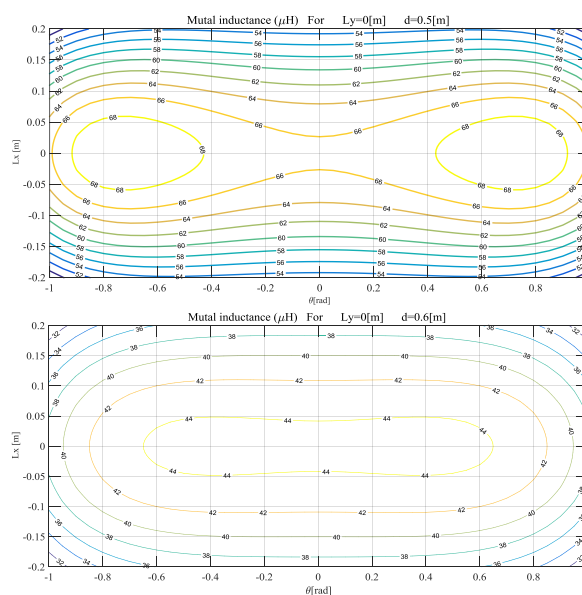
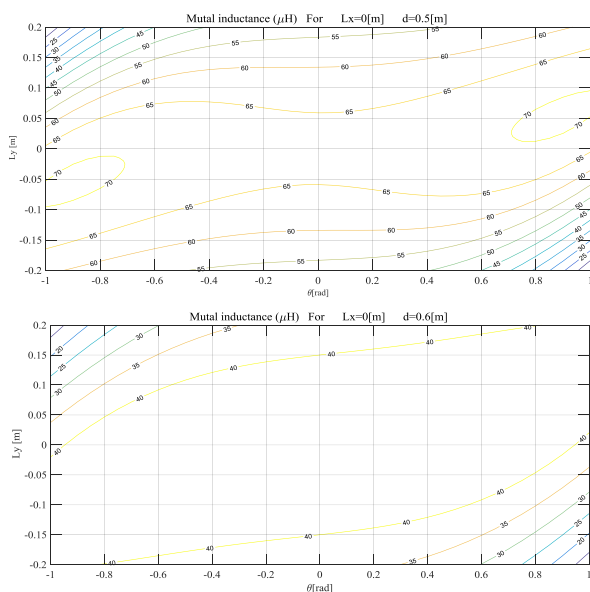
شکل (۴): اندوکتانس متقابل با عدم هم‌ترازی انتقالی در راستای محور x به اِزاء $d = 60 \text{ [cm]}$



شکل (۵): اندوکتانس متقابل با عدم هم‌ترازی انتقالی در راستای محور y به اِزاء $d = 60 \text{ [cm]}$



شکل (۶): اندوکتانس متقابل در عدم هم‌ترازی انتقالی در راستای x و y به اِزاء $d = 60 \text{ [cm]}$



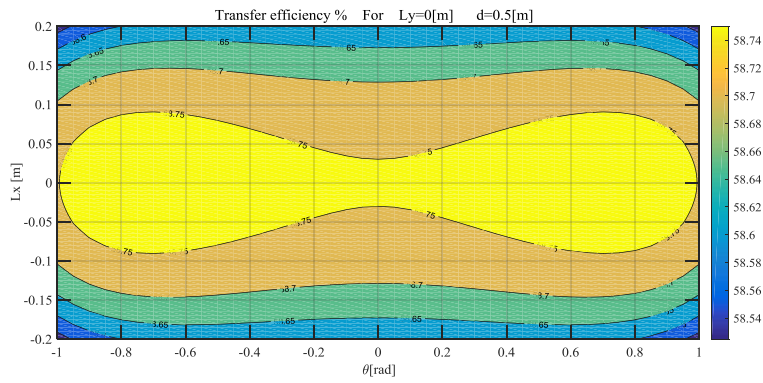
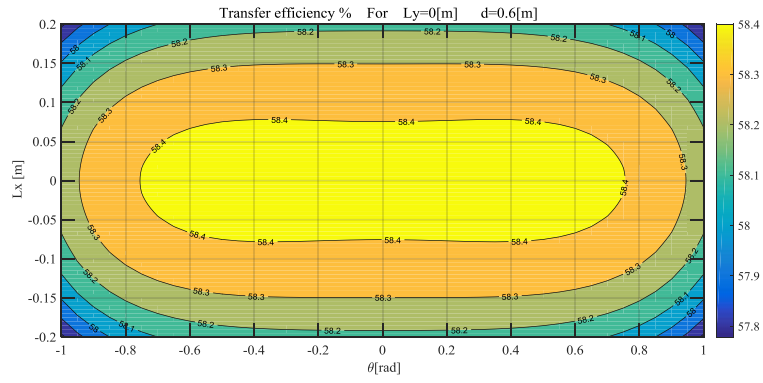
شکل (۷): اندوکتانس متقابل در عدم هم‌ترازی ترکیبی به ازاء $d = 50, 60$ [cm]

سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده را در شرایط انتقال توان ماکزیمم به بار به ازاء مقادیر معین مقاومت بار، فرکانس رزونانس و اندوکتانس متقابل معین نشان می‌دهد. این اشکال می‌تواند در طراحی بهینه سیم پیچ‌ها کمک شایانی نمایند. در جدول (۳) مقادیر شبیه‌سازی شده اندوکتانس متقابل ناشی از تاثیر شعاع سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده به ازاء $d = 60$ [cm] $L_x = 1$ [cm]، $L_y = 0.5$ [cm] و $\theta = 15$ [deg] ارائه شده است. همانگونه که از این جدول مشاهده می‌گردد افزایش شعاع سیم‌پیچ‌ها سبب افزایش اندوکتانس متقابل یا بازده می‌گردد.

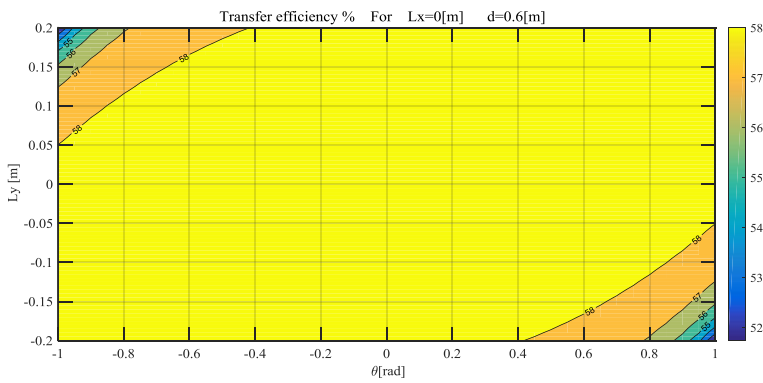
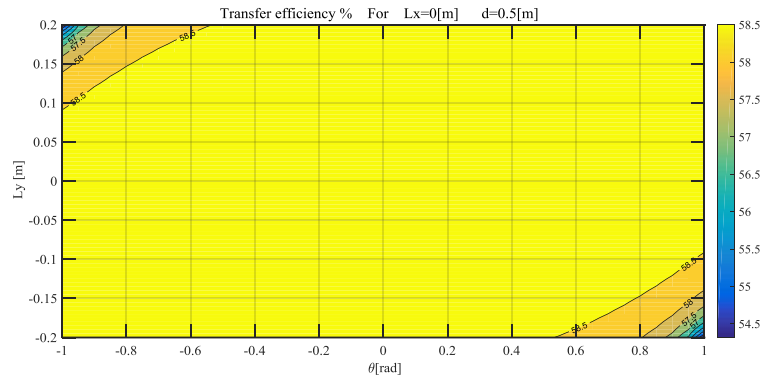
به عبارت دیگر در هر نوع عدم هم‌ترازی می‌توان با تنظیم r_1 ، r_2 و θ اندوکتانس متقابل را بیشینه نمود. لذا در سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی، با تنظیم این سه پارامتر می‌توان بیشینه اندوکتانس متقابل را در یک نوع عدم هم‌ترازی محقق نمود. شکل‌های (۹-۸) مقدار بازده سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی را در شرایط عدم هم‌ترازی ترکیبی را نشان می‌دهند. ترسیم کانتورهای بازده در این شکل‌ها گویای درستی مطالب ارائه شده یعنی یکسان بودن مکان هندسی بیشینه اندوکتانس متقابل با بیشینه بازده است. شکل‌های (۱۰-۱۱) مقادیر مقاومت

جدول (۳): مقدار اندوکتانس متقابل برحسب میکرو هانری برای تغییرات شعاع فرستنده و گیرنده در فاصله ۶۰ cm، فاصله ۰/۵ cm در محور Y، فاصله ۱ cm در محور X و چرخش ۱۵ درجه

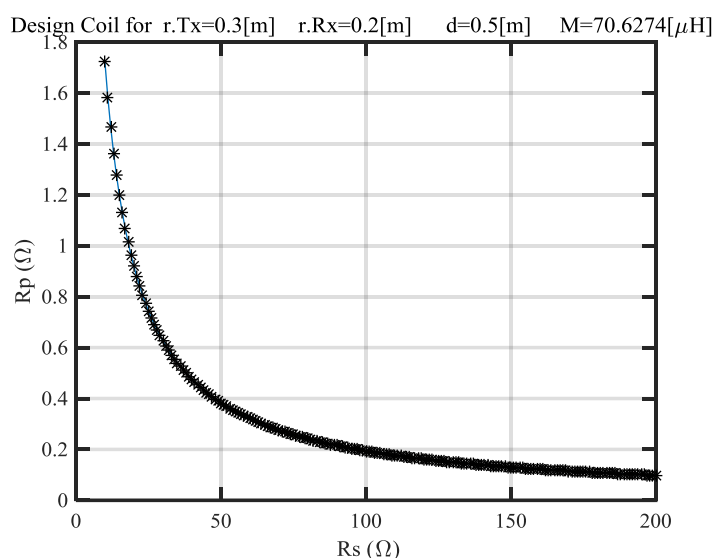
شعاع فرستنده (متر) / شعاع گیرنده (متر)	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰
۰/۱	۱,۶۹۹۵۰	۳,۶۴۶۸۳	۶,۰۸۰۹۰	۸,۷۸۲۱۰	۱۱,۵۴۴۶	۱۴,۲۰۰۱	۱۶,۶۲۸۸	۱۸,۷۵۸۳	۲۰,۵۵۶۷
۰/۱۵	۳,۶۷۵۹۰	۷,۹۰۹۱۵	۱۳,۲۳۲۷	۱۹,۱۸۲۹	۲۵,۳۱۵۰	۳۱,۲۵۵۴	۳۶,۷۲۹۲	۴۱,۵۶۲۹	۴۵,۶۷۲۷
۰/۲۰	۶,۱۸۹۱۲	۱۳,۳۶۴۰	۲۲,۴۵۹۸	۳۲,۷۲۳۶	۴۳,۴۱۱۰	۵۳,۸۷۴۱	۶۳,۶۱۴۶	۷۲,۳۰۰۸	۷۹,۷۵۵۳
۰/۲۵	۹,۰۳۱۹۰	۱۹,۵۸۴۱	۳۳,۰۸۹۶	۴۸,۵۰۵۵	۶۴,۷۶۱۳	۸۰,۸۸۴۱	۹۶,۰۸۷۵	۱۰۹,۸۱۳	۱۲۱,۷۳۲
۰/۳۰	۱۱,۹۹۳۸	۲۶,۱۲۵۲	۴۴,۴۰۲۵	۶۵,۵۳۴۹	۸۸,۱۴۱۲	۱۱۰,۹۰۳	۱۳۲,۶۹۴	۱۵۲,۶۵۹	۱۷۰,۳۴۱
۰/۳۵	۱۴,۸۸۷۶	۳۲,۵۷۹۳	۵۵,۷۱۱۴	۸۲,۸۲۲۱	۱۱۲,۲۷۷	۱۴۲,۴۳۴	۱۷۱,۸۰۱	۱۹۹,۱۶۳	۲۲۳,۶۵۴
۰/۴۰	۱۷,۵۶۶۳	۳۸,۶۱۴۴	۶۶,۴۳۰۱	۹۹,۴۷۶۵	۱۳۵,۹۵۹	۱۷۳,۹۷۴	۲۱۱,۶۸۵	۲۴۷,۴۸۲	۲۸۰,۱۱۴
۰/۴۵	۱۹,۹۳۱۷	۴۳,۹۹۶۳	۷۶,۱۱۸۱	۱۱۴,۷۸۱	۱۵۸,۱۴۱	۲۰۴,۱۳۸	۲۵۰,۶۵۵	۲۹۵,۷۰۵	۳۳۷,۶۰۱
۰/۵۰	۲۱,۹۳۱۸	۴۸,۵۹۰۵	۸۴,۴۹۷۳	۱۲۸,۲۳۸	۱۷۸,۰۲۶	۲۳۱,۷۶۸	۲۸۷,۱۸۳	۳۴۱,۹۷۶	۳۹۴,۰۳۵



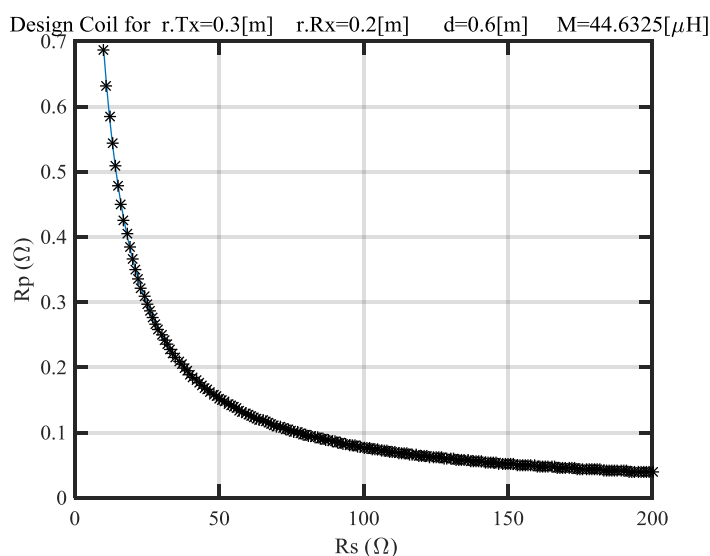
شکل (۸): بازده در عدم هم ترازی ترکیبی به ازاء $d = 50, 60 [cm]$



شکل (۹): بازده در عدم هم ترازی ترکیبی به ازاء $d = 50, 60 [cm]$



شکل (۱۰): نمودار مقاومت‌های بهینه سیم‌پیچی‌های فرستنده R_s و گیرنده R_p به ازاء $d = 50 [cm]$



شکل (۱۱): نمودار مقاومت‌های بهینه سیم‌پیچی‌های فرستنده R_s و گیرنده R_p به ازاء $d = 60 [cm]$

۵- نتیجه‌گیری

و بازده الزامی است. همچنین نشان داده شد جهت انتقال توان ماکزیمم به بار، طراحی مقاومت سیم‌پیچ فرستنده و گیرنده در مقادیر معین اندوکتانس متقابل، مقاومت بار و فرکانس شدید الزامی و ممکن است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقدار اندوکتانس متقابل به هندسه سیم‌پیچ‌ها و مختصات آن‌ها بستگی دارد.

۶- مراجع

- [1] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 7, no. 4, pp. 529-539, Nov. 2011.

عدم هم‌ترازی سیم‌پیچ‌ها، در سیستم انتقال توان بی‌سیم القایی یک مسئله اساسی است و تأثیر آن بر روی بازده انتقال توان بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله، از روش عددی گوس سه‌نقطه تعمیم‌یافته برای حل عددی اندوکتانس متقابل در حالت‌های مختلف عدم هم‌ترازی سیم‌پیچ‌ها استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تنظیم I_{rx} ، I_{ry} و θ می‌توان بازده توان انتقال یافته را در موقعیت مختلف قرارگیری خودرو الکتریکی تحت شارژ را بیشینه نمود و هم‌تراز بودن، بهینه‌ترین حالت است. در سایر شرایط، جواب‌های بهینه نسبی برای اندوکتانس متقابل وجود دارد. لذا اجازه تحرک و چرخش به سیم‌پیچ فرستنده جهت به‌دست آوردن بیشینه اندوکتانس متقابل

- [10] Siqi Li, and Chunting Chris Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, March 2015.
- [11] C. Gao and M. A. Redfern, "A Review of Voltage Control in Smart Grid and Smart Metering Technologies on Distribution Networks," Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of 2011 46th International, pp. 1 –5, Sep. 2011.
- [12] Wenxing Zhong, Chi Kwan Lee, S. Y. Ron Hui. "General Analysis on the Use of Tesla's Resonators in Domino Forms for Wireless Power Transfer". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, January 2013.
- [13] J. Meins, "Contactless inductive power supply," Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Proc. MAGLEV, 2006, pp.1-9, 2006.
- [14] Tan, L. L., X. L. Huang, H. Huang, Y. W. Zou, and H. Li, "Transfer efficiency optimal control of magnetic resonance coupled system of wireless power transfer based on frequency control", Sci. China Tech. Sci., Vol. 54, No. 6, 1428-1434, 2011.
- [15] Fu, W. Z., B. Zhang, D. Y. Qiu, and W. Wang, "Maximum efficiency analysis and design of self-resonance coupling coils for wireless power transmission system", Proceedings of the CSEE, Vol. 19, No. 18, 21-26, 2009.
- [16] Fotopoulou, K. and B. W. Flynn, "Wireless power transfer in loosely coupled links: Coil misalignment model", IEEE Trans. Magn., Vol. 47, No. 2, 416-430, 2011.
- [17] Tremblay O, Dessaint L-"A Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. In: EVS24 international battery, hybrid and fuel cell electric vehicle", symposium, Stavanger, Norway, 13–16 May 2009.
- [2] Jang, Y. and M. M. Jovanovic, "A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers", IEEE Trans. Industrial Electro., Vol. 50, No. 3, 520-527, 2003.
- [3] V. C. Gungor and D. Sahin, "Cognitive Radio Networks for Smart Grid Applications: A Promising Technology to Overcome Spectrum Inefficiency," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 7, no. 2, pp. 41 –46, Jun. 2012.
- [4] Jung, K. H., Y. H. Kim, J. Kim, and Y. J. Kim, "Wireless power transmission for implantable devices using inductive component of closed magnetic circuit", Electro. Letters, Vol. 45, No. 1, 21-22, 2009.
- [5] S. Y. R. Hui, Wenxing Zhong, and C. K. Lee. "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 9, September 2014.
- [6] Yu, C. L., R. G. Lu, Y. H. Mao, L. T. Ren, and C. B. Zhu, "Research on the model of magnetic-resonance based wireless energy transfer system", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 414-418, Dearborn, MI, Sep. 2009.
- [7] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science, Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [8] W. Kempton., J. Tomic., "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy," Journal of Power Sources, Vol. 144, Issue 1, pp. 280-294, Jun. 2005.
- [9] M. Ferdowsi, "Plug-in electric drive vehicles: experiences in research and education," in Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Pittsburgh, PA, July 2008.