**استراتژی تطبیقی توزیع عادلانه توان برای شارژر خودروهای الکتریکی بدون تماس چند خروجی**

محمدحسن عامری1، علی یزدیان ورجانی2 و مصطفی محمدیان3

1دانشجوی دکتری دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس m.ameri@modares.ac.ir

2هیئت علمی دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس، yazdian@modares.ac.ir

3 هیئت علمی دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس ، mohamadian@modares.ac.ir

**چکیده-با تجمیع سیستم شارژر القایی خودرو در قالب یک سیستم چند خروجی شارژ خودرو میتوان هزینه پارکینگ­های هوشمند شارژرهای القایی را کاهش داد. مهمترین مشکل یک سیستم شارژ القایی چند خروجی انتخاب فرکانس کاری سیستم است. در این مقاله استراتژی تطبیقی شارژ عادلانه توان برای انتخاب فرکانس کاری بهینه سیستم پیشنهاد می­شود. در این استراتژی بهینه سازی فرکانس با هدف توزیع متوازن توان بین خودروها و کاهش عادلانه زمان شارژ هر خودرو می­باشد. ظرفیت توان تحویلی به بار در یک شارژر القایی خودرو به فرکانس کاری مبدل وابسته است. وابسته بودن مشخصه فرکانس- توان هر یک از خروجی­ها به موقعیت قرار گیری خودرو نسبت به صفحه شارژ مشخصه فرکانس توان هر یک از خروجی­های شارژر در هر بار استفاده متفاوت می­کند. متفاوت بودن فرکانس بهینه هریک از خروجی­ها انتخاب فرکانس کاری سیستم را با یک چالش جدی روبه رو می­کند. در استراتژی پیشنهادی، فرکانس بهینه براساس تغییرات توان تحویلی به هر خودرو در طی فرآیند شارژ به روز رسانی می­شود. در نهایت الگوریتم پیشنهادی بر روی یک نمونه آزمایشگاهی پیاده سازی شده است تا صحت ادعاهای فوق تایید شود**

کلید واژه: انتقال القایی توان، توزیع عادلانه توان، شارژ چند خروجی

**1- مقدمه**

مهمترین دلیلی که خودروهای الکتریکی با اقبال عمومی مواجه نمی­شوند مسافت کوتاه طی شده با هر بار شارژ و زمان طولانی شارژ می­باشد. شارژ اتوماتیک خودرو در مسیر یا در زمان متوقف بودن راه حلی مناسبی برای این معضل خودروهای الکتریکی است. نخستین قدم در شارژ اتوماتیک خودرو حذف نیاز به اتصال خودرو به شارژر توسط کاربر است. سیستم انتقال القایی توان (IPT) بهترین جایگزین اتصال فیزیکی خودرو به شارژر است[1].

شكل 1 (الف ,ب) ساختار معمول براي شارژر القايي n خودرو برقی در یک مجتمع مسکونی را نشان مي‌دهد. اگر هدف ایجاد یک پارکینگ مجهز به تکنولوژی شارژ IPT برای کل مجتمع باشد. آنگاه n شارژر خودرو برقی برای این پارکینگ و در نتیجه n مبدل الکترونیک قدرت مورد نیاز می باشد. برای کاهش هزینه، مطابق شكل 1- ب می­توان بجای استفاده از n سیستم IPT مجزا از یک سیستم n خروجی استفاده کرد.

یکی از اولین کاربردهای بیان شده برای IPT چند خروجی استفاده از سیستم IPT به عنوان ایزولاتور گیت سوییچ است [2]. مقاله [3]تاثیر استفاده از چند بار مشترک را بررسی کرده است. در این مطالعه IPT به صورت یک ترانسفورماتور یک ورودی چند خروجی مدل­ شده است. در سیستم­های IPT چند خروجی بارهای متصل به خروجی ­های سیستم الزاما متشابه نیستند. [4]یک نوع IPT دو خروجی پیشنهاد کرده است که از خروجی دوم به عنوان انتقال اطلاعات (data) استفاده شده است. به علت لزوم جابجایی اطلاعات بین اولیه و ثانویه IPT از یک مبدل دو طرفه bidirectional در سیستم انتقال اطلاعات بهره برده شده است.

مهمترین موضوعی که در یک انتقال توان مستقل از تعداد خروجی­های آن اهمیت دارد میزان توان انتقالی یا به عبارت دیگر ظرفیت توان انتقالی است. کاهش اندازه توان انتقالی به یک خودرو الکتریکی به معنی افزایش مدت زمان شارژ آن و هدر رفتن زمان است. در مبدل­های رزونانسی مانند IPT تنها در یک فرکانس خاص ظرفیت انتقال توان از اولیه به ثانویه بیشینه خواهد بود[5]–[7]به علت مشترک بودن اینورتر سمت اولیه در شارژر چند خروجی پیشنهادی شکل 1- ب فرکانس بیشینه توان هریک از خروجی­ها باید یکسان باشد تا بیشینه توان به تمام بارها انتقال یابد. اما در یک سیستم چند خروجی مانند پارکینگ شارژ IPT به دلایلی غیر قابل پیش­بینی مانند تغییر موقعیت قرارگیری اولیه و ثانویه، تغییر مشخصات برخی اجزای الکتریکی مدار همچون ظرفیت خازن­ها فرکانس بهینه هریک از خروجی­ها می­تواند متفاوت از مقدار طراحی شده باشد[5]. در هیچ یک از مطالعاتی که تا کنون در زمینه IPT های چند خروجی صورت گرفته است بهینه سازی فرکانس سیستم مورد بررسی قرار نگرفته است. به علت اهمیتی که میزان توان انتقالی در سیستم­های IPT دارد در این مقاله سعی شده است با پیشنهاد استراتژي‌ شارژ عادلانه بهینه­ترین الگوریتم ممکن برای انتخاب فرکانس کاری شارژرهای چند خروجی ارائه شود. در یک سیستم چند خروجی مشکل اصلی یافتن فرکانس بیشینه هر یک از بارها نمی­باشد. بلکه مشکل یافتن مکانیسمی است که تضمین نماید همواره بهترین انتخاب برای انتخاب فرکانس بهینه صورت گرفته است. در این استراتژی، بهینه سازی فرکانس با هدف توزیع متوازن توان بین خودروها و کاهش عادلانه زمان شارژ هر خودرو انجام می­شود.



(الف)



(ب)

شکل 1 شمای کلی شارژر القایی خودرو ب) چند خروجي با باس dc مشترک (ج) چند خروجي با باس DC مشترك

ساختار مقاله به این شرح است: در بخش دوم نگاه به شارژرهای IPTچند خروجی شده است. در بخش سوم ساختارهای مختلف استراتژی­ پیشنهادی مطرح و مورد نقد قرار می­گیرد. نتایج پیاده سازی استراتژی مطرح شده بر روی نمونه آزمایشگاهی در بخش 4 ارائه میشود. در پایان در بخش 5 جمع­بندی و نتیجه گیری ارائه می­شود.

**2- شارژرهای IPT چند خروجی**

تحلیل یک شارژر القایی تک خروجی نخستین گام در تحلیل سیستم چند خروجی مورد نظر است.

**2-1- تحلیل شارژرهای القایی تک خروجی**

در کاربردهایی مانند شارژر خودروهای الکتریکی یا انتقال توان به خودروهای در حال حرکت که توان دریافتی در محدوده وسیعی تغییر می­کند نقطه کار سیستم باید نسبت به تغییرات بار مقاوم باشد. بهره ولتاژ سیستم شکل (1-الف) برابر معادله (1) است.

(1)

برای بررسی حساسیت بهره ولتاژ به تغییرات بار باید از (1) استفاده کرد.

 (2)

با برابر صفر قرار دادن معادله (2) نقطه کارهایی که در مقابل تغییرات بار مقاوم هستند به دست می­آیند. رابطه (3) فرکانس این سه نقطه کار را نشان می­دهد.

 (3)

در شکل (2) نمودار تغیییرات بهره ولتاژ – فرکانس یک سیستم را به ازای مقادیر مختلف بار نشان داده شده است. خطوط عمودی پر رنگ شده امتداد نقطه کارهای مقاوم به تغییرات بار را نشان می­دهد. براساس شکل (2) فرکانس کاری بهینه برای مبدل سری فرکانس s1می­باشد. در این فرکانس دامنه تغییرات ولتاژ خروجی به ازای تغییر بار کمترین مقدار است. بنابراین نقطه­کارS1مناسب­ترین نقطه کار بهینه برای هریک از خروجی­های شارژر چند خروجی ­می­باشد.



*شکل 2: نمودار تغییرات ولتاژ خروجی مبدل سری برحسب فرکانس*

**2-2- تحلیل مبدل­های IPT چند خروجی**

اندوکتانس­های ترانسفورماتور IPT به موقعیت ثانویه ترانسفورماتور IPT نسبت به اولیه آن وابسته است. هنگام طراحی یک شارژر IPT برای شارژ خودروها انتظار اینکه هر خودرو به گونه­ای در محل مورد نظر پارک می­شود که صفحه شارژ ثانویه دقیقا هم محور با صفحه شارژر اولیه قرار می­گیرد انتظار غیر واقعی است. بنابراین مقدار اندوکتانس­های ترانسفورماتور IPT دارای انحراف از مقدار طراحی شده است. عللی مانند تغییرات دما و افزایش عمر خازن­ها ظرفیت آن­ها را تغییر می­دهد. متغییر بودن ظرفیت خازنها و اندازه اندوکتانس مدار IPT سبب تغییر در اندازه فرکانس رزونانس به ازای هریک از خروجی­ها می­شود.

یک شارژر دو خروجی همانند شکل (2-ب) مفروض است. فرکانس رزونانس طراحی شده هر یک از خروجی­های آن برابر (18 کیلو هرتز) است. در حین پیاده سازی خازن مدار شارژر دوم 10 در صد انحراف از مقدار طراحی شده دارد. بنابراین فرکانس رزونانس خازن دوم 5 درصد انحراف نسبت به فرکانس رزونانس مدار اول دارد. شکل (3) نمودار تغییرات توان ورودی و توان تحویلی به هر یک از بار­ها را برحسب فرکانس به ازای مقادیر جدید خازن نشان می­دهد. براساس این شکل اگر فرکانس کاری مبدل برابر فرکانس رزونانس شارژر اول باشد آنگاه بیشینه توان انتقالی به بار دوم برابر است با: 870 وات و بلعکس به ازای کارکرد مدار در فرکانس بهینه شارژر دوم بیشینه توان بار اول برابر میشود با : 500 وات. مقایسه این نتایج روشن می­سازد یک خطای 10% در مقدار خازن می­تواند منجر به کاهش 60 درصدی ظرفیت توان انتقالی شود. بنابراین در انتخاب فرکانس بهینه مبدل­های القایی چند خروجی مصالحه­ای باید بین فرکانس بهینه هریک از خروجی­ها صورت بگیرد.

*شکل 3: نمودار توان- فرکانس شارژر دو خروجی با خطای 10%* 3- نقطه کار بهینه شارژرهای چند خروجی.

**3- استراتژي­ توزیع عادلانه توان**

تعيين هدف نخستین و مهمترین گام در بهینه­سازی سيستم­هاي مهندسی است. در این پژوهش هدف گذاری برای فرکانس کاری بهینه، توزیع عادلانه توان بین بارها است. انحراف توان تحویلی به خودرو از توان درخواستی سبب افزایش مدت زمان شارژ خودرو می­شود. رابطه (4) میزان افزایش مدت زمان شارژ خودرو را برحسب توان تحویلی به بار نشان میدهد. در رابطه (4) Ebatt انرژی مورد نیاز باتری برای شارژ، Pmax بیشینه ظرفیت توان تحولی به خودرو است. همچنین Tmin و Tact به ترتیب برابر است با کمینه زمان لازم برای شارژ خودرو و مدت زمان واقعی شارژ خودرو. ΔTe خطای نسبی مدت زمان شارژ خودرو میباشد.

 (4)

استراتژی توزیع عادلانه توان عبارت است از کمینه کردن اختلاف بین خطای نسبی مدت زمان شارژ خودروهای مختلف متصل به یک سیستم چند خروجی می­باشد. بنابراین تابع هدف استراتژی عادلانه به صورت رابطه (5) تعریف می­شود.

 (5)

به لحاظ تئوری کمترین مقدار رابطه (5) برابر 0 می­باشد. کمینه مقدار زمانی بدست می­آید که خطای نسبی زمان شارژ هر خودرو برابر با متوسط خطای نسبی زمان شارژ کل سیستم باشد. به عبارت دیگر تابع هزینه استراتژی شارژ بهینه زمانی کمینه میشود که هر یک از بارها با یکدیگر برابر باشند.

برای یک سیستم دو خروجی شرط کمینه شدن تابع هزینه به صورت رابطه (6) قابل نوشتن است. معادله تغییرات توان برحسب فرکانس در (7) نشان داده شده است. با جایگزینی معادله (7) در (6) رابطه فرکانس بهینه توان به صورت معادله (8) قابل نوشتن است.

 (6)

 (7)

 (8) (12)

با تعمیم رابطه (8) برای یک سیستم چند خروجی معادله () استخراج می­شود.

 (9)

که در آن PMax-i-var بیشینه توان اکتیو هریک از بارها به ازای شرایط جدید بار می­باشد. معادله (9) نشان می­دهد فرکانس بهینه کل سیستم در هر لحظه وابسته است به فرکانس بهینه هر یک از بارها در شرایط مختلف. در این استراتژی پس مشخص شدن فرکانس بیشینه توان هر یک از بارها، فرکانس بهینه سیستم از طریق رابطه (9) تعیین می­شود. در ابتدای این استراتژی، مقادیر PMax-i-var از طریق آزمون تشخیص فرکانس بیشینه تعیین می­شود. مقدار توان تحویلی به هر یک از بارها در فرکانس بهینه fopt به عنوان مقدار پیش­فرض توان آن بار در نظر گرفته می­شود. به ازای تغییر توان تحویلی هریک از بارها نسبت به مقدار پیش­فرض توان بیشینه آن بار اصلاح می­شود. برای اصلاح توان بیشینه بار iام فرکانس بیشینه آن بار (fopt-i) به عنوان فرکانس سیستم انتخاب می­شود. مقدار توان انتقالی به بار iام در این حالت به عنوان مقدار جدید PMax-i-varتعیین می­شود. . این عمل برای تمام بارهایی که مقدار توان عبوری آنها تغییر کرده است تکرار می­شود. سپس فرکانس جدید بهینه به ازای مقادیر جدید توان بیشینه بار محاسبه می­شود.

با توجه به اینکه در تغذیه بارهای مختلف همواره بحث اولویت بندی مطرح است لذا در سامانه انتخاب سیستم بهینه باید بتوان علاوه بر تعیین فرکانس بهینه برای کل سیستم فرکانس کاری را به گونه­ای تعیین کرد که بار با اولویت بالاتر از توان بیشتری در مقایسه با سایر بارها بهره ببرد. روش برای اولیت بندی بارها استفاده از ضرایب وزنی پیشنهاد می­شود. براساس ضرایب وزنی رابطه تعیین فرکانس بهینه به صورت (10) بازنویسی می­شود. در رابطه (10) wi ضرایب وزنی می­باشند به قسمی­که مجموع ضرایب وزنی تمام بارها باید برابر 1 باشد. مقدار ضریب هر بار توسط خود بار یا سیستم مدیریت توان (Power Manager Unit ) پخش می­شود.

 (10)

**4- ارزيابي استراتژی پيشنهادي**

برای بررسی استراتژی پیشنهادی از یک نمونه آزمایشگاهی مبدل انتقال توان دو خروجی مشابه شکل (4) استفاده می­شود. اندازه پارامترهای مداری نمونه ساخته شده در جدول (1) آورده شده است. پارامترهای مغناطیسی نشتی و مغناطیس کننده با استفاده از مدل­سازی ریاضی ارائه شده در مقاله [8] محاسبه شده است. به علت مسائل ایمنی ولتاژ تغذیه ورودی سیستم به 20 ولت و حداکثر جریان ورودی به 3 آمپر محدود شده است.



*شکل 4: نمونه آزمایشگاهی ساخته شده*

*جدول 1: مشخصات نمونه آزمایشگاهی*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| C1 | LM | L1 | Vi |  |
| 100nF | 780µH | 701µH | 20v | First output |
| 100nF | 780µH | 701µH | 20v | Second output |

الگوریتم کنترل از طریق یک برد نمونه PCI-1730 پیاده سازی می­شود که براساس نمونه­های جریان و ولتاژ خروجی­های سیستم فرکانس کلیدزنی اینورتر ورودی را تعیین می­کند. این فرکانس به عنوان ورودی یک میکروکنترلرDSPIC4011 که وظیفه تولید دستورات کلید­زنی اینورتر دارد در نظر گرفته می­شود. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی دو آزمون انجام شد.

در آزمون نخست تغییرات فرکانس بهینه کل سیستم به ازای تغییر توان مصرفی بار اول بررسی می­شود. در این آزمون پس از تعیین فرکانس بهینه کل سیستم بار اول از مدار خارج می­شود. پس گذشت مدت زمانی مجددا بار اول در مدار قرار می­گیرد.

*ب*

*الف*

*شکل 5: نتایج تاثیر از مدار خارج شدن یک بار در نمونه آزمایشگاهی: الف- نمودار تغییرات توان، ب- نمودار تغییرات فرکانس*

شکل 5-الف و ب نمودار­های توان و فرکانس نمونه برداری شده توسط برد PCI1730 را نشان می­دهد. براساس نمودارهای نشان داده شده هریک از خروجی­ها دارای توان و فرکانس بهینه متفاوتی می­باشند. همانند الگوریتم پیشنهادی ابتدا فرکانس بهینه هریک از خروجی­ها تشخیص داده می­شود. سپس براساس معادله (10) بیشینه توان سیستم محاسبه می­شود. در این آزمون ضرایب وزنی برابر0.5 فرض می­شود. در ادامه بار اول از مدار خارج می­شود. با تغییر توان خروجی اول، سیستم سعی در به روز رسانی مقدار توان بهینه بار اول با انتخاب فرکانس بهینه بار اول به عنوان فرکانس کاری سیستم می­کند. سپس فرکانس کاری جدید سیستم براساس مقدار جدید توان بهینه هریک از بارها محاسبه می­شود. ملاحظه می­شود با صفر شدن توان دریافتی بار اول فرکانس کاری سیستم برابر فرکانس بهینه بار دوم شده است. در ادامه با در مدار قرار گرفتن مجدد بار اول و تشخیص تغییرات توان خروجی اول توسط سیستم مقدار توان بهینه بار اول براساس الگوریتم پیشنهادی مجددا اصلاح می­شود. بالازدگی­هایی که در نمودار تغییرات فرکانس شکل (5) دیده می­شود مربوط به مکانزیم اصلاح بیشینه توان بار اول می­باشد. براساس شکل (5) با در مدار قرار گرفتن مجدد بار اول فرکانس کاری سیستم برابر فرکانس کاری اولیه سیستم پیش از خارج شدن بار اول می­باشد.

*(ب)*

*الف*

*شکل 6: نتایج تاثیر ضریب وزنی در نمونه آزمایشگاهی: الف- نمودار تغییرات توان، ب- نمودار تغییرات فرکانس*

در آزمایش دوم تاثیر تغییرات ضریب وزنی در انتخاب فرکانس بهینه سیستم بررسی شده است. پس از تثبیت فرکانس کاری سیستم ضریب وزنی بارهای اول و دوم از مقدار پیشفرض0.5 به ترتیب به 0.3 و 0.7 تغییر میکند. پس از گذشت مدت زمانی مقادیر ضرایب وزنی به 0.7 برای بار اول و 0.3 برای بار دوم مجددا تغییر داده می­شود. نمودارهای الف و ب شکل (6) تغییرات توان و فرکانس سیستم را به ازای مقادیر مختلف ضریب وزنی نشان می­دهد. ملاحظه می­شود با تغییر ضریب وزنی اندازه توان تحویلی به بارها به خوبی تغییر می­کند.

بررسی نتایج دو آزمون انجام شده برروی نمونه آزمایشگاهی پیاده سازی ­شده نشان می­دهد استراتژی پیشنهادی تمام قابلیتهای ادعا شده را در عمل نیز دارا می­باشد.

**5- نتیجه گیری**:

استفاده از یک شارژر چند خروجی به جای چندین شارژر تک خروجی برای شارژ خودروهای الکتریکی می­تواند هزینه استفاده از سیستم شارژر القایی توان را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در یک شارژر القایی توان، ظرفیت توان تحویلی به هر خودرو به فرکانس کاری مبدل اولیه شارژر وابسته است. به علت متفاوت بودن مشخصات مغناطیسی خروجی­های مختلف یک شارژر القایی توان فرکانس بیشینه توان تحویلی به هر یک از خودروها متفاوت است. به علت مشترک بودن مبدل اولیه عدم انتخاب فرکانس مناسب می­تواند سبب کاهش تا 70% ظرفیت توان تحویلی به خودرو شود. در این مقاله استراتژی توزیع عادلانه توان ارائه شد که می­تواند فرکانس بهینه مبدل را به گونه­ای تعیین کند که تفاوت خطای نسبی مدت زمان شارژ خودروهای متصل شده را کمینه کند. مهمترین ویژگی این استراتژی adaptive بودن نسبت به تغییرات توان هریک از خروجی­ها است. همچنین در الگوریتم پیشنهادی می­توان با تغییر ضرایب وزنی میزان اولویت تخصیص توان به بارهای مختلف را براساس درجه اهمیت آنها تغییر داد. نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مقاله صحت ادعاهای مطرح شده را تایید می­کند.

**6- مراجع**

[1]P. Bauer, M. Castilla, and F. Pijl, “Control method for wireless inductive energy transfer systems with relative large air gap,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, no. 99, pp. 1–1, 2013.

[2]S. C. Tang and S. Y. Hui, “Coreless printed circuit board (PCB) transformers with multiple secondary windings for complementary gate drive circuits,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 3, pp. 431–437, May 1999.

[3]D. Wesemann, S. Witte, and J.-S. Michels, “Effects of multiple loads in a contactless, inductively coupled linear power transfer system,” in *2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009*, 2009, pp. 54–59.

[4]R. Puers, K. Van Schuylenbergh, M. Catrysse, B. Hermans, and K. U. Leuven, “WIRELESS INDUCTIVE TRANSFER OF POWER AND DATA,” *Springer*, pp. 395–414, 2006.

[5]M. H. Ameri, A. Yazdian Varjani, and M. Mohamadian, “A novel algorithm for tracking maximum inductive transferred power point,” in *4th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2013)*, 2013, pp. 372–377.

[6]V. Brusamarello, “Power Transfer With an Inductive Link and Wireless Tuning,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 5, pp. 924–931, 2013.

[7]J. E. James, D. Robertson, and G. a Covic, “Improved AC Pickups for IPT Systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 12, pp. 6361–6374, 2014.

[8]C. Zierhofer and E. Hochmair, “Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils,” *Biomed. Eng. IEEE …*, vol. 43, no. 7, pp. 708–714, 1996.