

افزایش کیفیت توان میکروگرید با استفاده از خودروهای الکتریکی متصل به شبکه

حامد فریدونی گواسرائی^۱، سیروس محمدی^۲

hamed_fereydooni8@yahoo.com دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس،

sirusjozar@gmail.com استاد گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندر عباس،

چکیده - با توجه به گسترش بار های غیر خطی در شبکه قدرت و همچنین وجود منابع تولید پراکنده تجدید پذیر به عنوان اصلی ترین زیر ساخت شبکه های هوشمند و میکروگرید، نیاز شبکه برق به ادوات جبران ساز و بهبود دهنده کیفیت برق بیش از پیش بیشتر می شود. این مقاله استراتژی کنترل شارژر درونی خودرو های الکتریکی برده، به منظور کاهش جریان هارمونیک و بهبود کیفیت توان میکروگرید، را ارائه می دهد. اینورتر طراحی شده در خودرو برقی از نوع سه فاز بوده که توسط کنترل کننده مدولاسیون بردار فضایی با نمونه برداری از ولتاژ در نقطه اتصال به شبکه میکروگرید موجبات کاهش هارمونیک و افزایش کیفیت توان میکروگرید را فراهم می نماید.

کلید واژه- خودروی الکتریکی، کیفیت توان، مدولاسیون بردار فضایی، میکروگرید

۱- مقدمه

تأثیرگذار باشند [۷]. از نظر بهره بردار شبکه برق، تلفات توان در زمان شارژ یک مشکل اقتصادی است که باید به کمترین مقدار خود رسیده و از فروپاشی شبکه برق جلوگیری شود. علاوه بر تلفات توان، کیفیت توان از جمله نامتعادلی ولتاژ و مشخصه های آن و همچنین هارمونیک ها برای اپراتورهای شبکه و مصرف کنندگان حائز اهمیت می باشد. مطالعات فراوانی در زمینه پایداری و کیفیت شبکه میکروگرید بدلیل وجود منابع تولید پراکنده تجدید پذیر مانند توربین های بادی و منابع فتوولتائیک و همچنین افزایش بار های غیر خطی و ادوات الکترونیک صورت گرفته است. اعوجاج های هارمونیک یکی از نگرانی های کیفیت توان شبکه میکروگرید می باشد. افزایش هارمونیک در شبکه برق باعث ایجاد خطا در دستگاه های اندازه گیر، کلید های الکترونیکی، ادوات مخابراتی و ایجاد گرما و تلفات در خطوط و ترانسفورماتور های شبکه و همچنین مشکلات عدیده ای که منجر به کاهش قابلیت اطمینان می شود. یکی از راه های افزایش کیفیت توان و کاهش دادن هارمونیک، همچنین جبران توان راکتیو در همان زمان، بکارگیری فیلترهای اکتیو در شبکه میکروگرید می باشد. در این شرایط، این مقاله به بررسی امکان بکارگیری V2G به عنوان جایگزین فیلتر اکتیو مجازی در شبکه تست میکروگرید با در نظر گرفتن شرایط استاندارد IEEE-519 با استفاده از کنترلر مدولاسیون بردار فضایی (SVPWM) می پردازد. در بخش دوم مقاله، مدل میکروگرید مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته، در بخش سوم، طراحی کنترل کننده صورت گرفته و بخش چهارم شامل نتایج شبیه سازی بوده و در نهایت

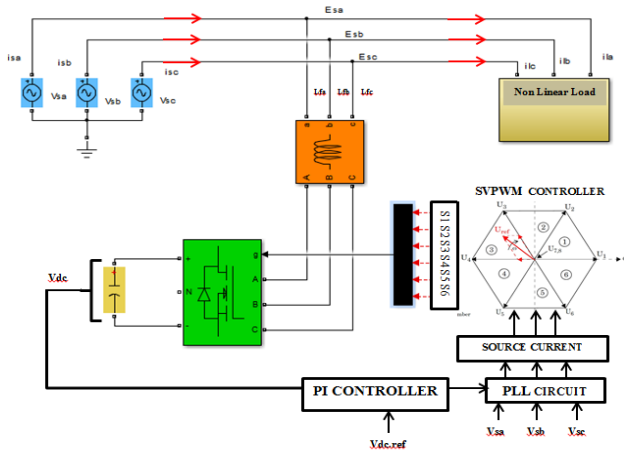
با توجه به چشم انداز انرژی در سال ۲۰۱۱، سهم سوخت مصرفی نفت در بخش حمل و نقل از ۴۰٪ در سال ۲۰۰۸ به ۵۴٪ افزایش خواهد یافت [۱]. از سوی دیگر، پیش بینی های انجام شده از سوی آژانس بین المللی انرژی (EIA) بیانگر افزایش قیمت نفت به ۵/۵۰ دلار بر گالن در بالاترین نرخ ممکن می باشد. بنابر این، فن آوری های مربوط به کاهش مصرف سوخت در بخش حمل و نقل، مانند خودروهای الکتریکی هیبریدی (PHEV) و خودرو های الکتریکی قابل اتصال به شبکه (V2G)، جایگاه خود را در بین وسایل نقلیه دیگر بیشتر نموده است. پیش بینی می شود در سال های آینده بسیاری از وسایل نقلیه ساخته شده، دارای گزینه پلاگین برای شارژ باتری خود خواهند بود و تا سال ۲۰۳۰ میلادی، توسعه نفوذ خودروی قابل اتصال به شبکه به ۲۵٪ خواهد رسید [۲]. خودروهای الکتریکی می توانند در هر مکانی در وضعیت پارک، مانند پارکینگ خانه و یا استگاه های شارژ، باتری خود را شارژ نمایند. بسیاری از محققان در زمینه جایابی بهینه پارکینگ ها و ایستگاه های شارژ خودروهای الکتریکی به مطالعه پرداخته اند. با V2G می توان فرصتی را برای طراحی شارژر دوسویه با عملکردی مانند فیلتر اکتیو در شبکه قدرت میکروگرید فراهم نمود. V2G ها می توانند در بازار خدمات جانبی به عنوان رزرو چرخان [۳]، تنظیم کننده [۴]، ذخیره ساز برای منابع انرژی تجدید پذیر [۵] و جبران ساز توان راکتیو برای افزایش کیفیت توان شرکت نمایند [۶]. با توجه به مدل قیمت گذاری برق، V2G ها می توانند در تغییرات منحنی بار

نتیجه گیری انجام شده است.

خودرو به عنوان فیلتر و جبران ساز توان راکتیو عمل نماید. مدولاسیون پیشنهادی در این مقاله مدولاسیون بردار فضایی می باشد، مطالعات نشان می دهد تکنیکهای PWM بر پایه مدولاسیون بردار فضایی چندین مزیت نسبت به تکنیک های PWM بر پایه کریر دارند که از جمله مجموع کل هارمونیک (THD) پایین تر، بهره ac بیشتر و پیاده سازی ساده تر با پردازنده سیگنال دیجیتال (DSP) می باشد. در طراحی کنترل کننده اینورتر V2G در این مقاله سیم نول در نظر گرفته نشده است. این کنترل کننده از چند بخش اصلی با توجه به شکل ۳ تشکیل شده است.

۳-۱- تکنیک SVM و حالت های کلید زنی

در روش SVM بایستی تمامی حالات ممکن کلیدزنی اینورتر بدست آید. هر ساق اینورتر سه فاز دارای دو وضعیت P یا N است. که P بیانگر روشن بودن کلید پایینی ساق و خاموش بودن کلید بالایی آن ساق است. روشن بودن هم زمان دو سوئیچ در یک ساق به علت ایجاد اتصال کوتاه لینک dc امکان پذیر نمی باشد. بنابراین با توجه به این که اینورتر سه فاز سه ساق داشته و هر ساق دارای دو وضعیت کلیدزنی است حالت کلیدزنی وجود دارد. بخشی از هسته اصلی خودروی الکتریکی با کارکردی به عنوان فیلتر اکتیو مجازی در شکل ۳ آمده است.

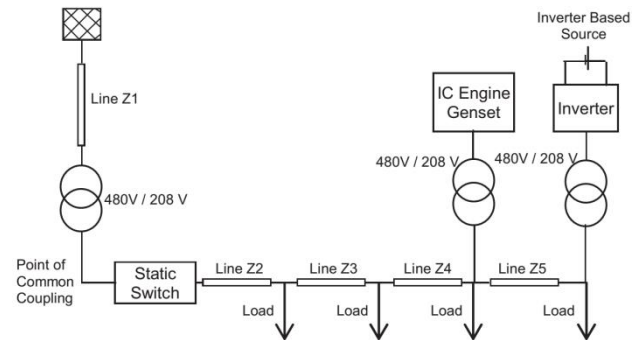


شکل ۳: بلوک دیاگرام پیشنهادی کنترل کننده V2G

این توپولوژی تشکیل شده از اتصال اینورتر با خازن dc در یک نقطه اتصال مشترک (PCC) موازی با بار غیر خطی. در اینجا منبع، و جریان اینورتر به ترتیب با V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} بیانگر منبع ولتاژ می باشد. جریان بار، جریان منبع، و جریان اینورتر به ترتیب با I_{fa}, I_{fb}, I_{fc} و I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} نشان داده شده است. خازن dc نیز به عنوان ذخیره ساز انرژی در سمت ac-dc و حفظ ثبات

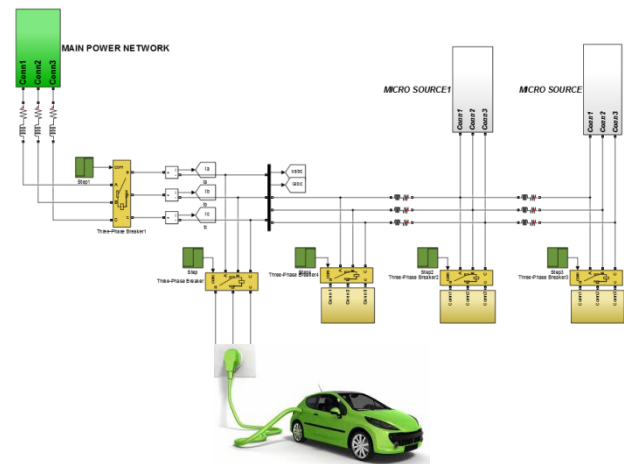
۲- مدل شبکه میکروگرید

میکروگرید نمونه ای که به عنوان شبکه تست در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است بطور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است [۸]. این میکروگرید شامل منابع تولید پراکنده تجدید پذیر نظیر فتوولتائیک می باشد که می توان بصورت متصل و یا منفصل از شبکه قدرت اصلی از آن بهره برداری نمود. اتصال V2G به یکی از باس های میکروگرید بصورت سه فاز در نرم افزار Matlab/Simulink در شکل ۲ مشخص شده است.



شکل ۱: شبکه تست میکروگرید مورد مطالعه [۸]

بار های متصل به شبکه از نوع بار های غیر خطی خانگی بوده که هر کدام به منبع تولید پراکنده متصل می باشند و ریزشبه در زمان نیاز می تواند به شبکه سراسری متصل گردد.



شکل ۲: مدل شبیه سازی شده میکروگرید مورد مطالعه

۳- طراحی کنترلر

هدف از طراحی کنترل کننده این است که کنترل سوئیچینگ اینورتر V2G به گونه ای باشد که ساختار درونی

$$V_{fc} = L_f \frac{di_{fc}}{dt} + E_{sc} \quad (6)$$

با استفاده از روابط (۴)، (۵)، (۶) ولتاژ اینورتر را می توان بصورت رابطه (۷) تعریف نمود:

$$V_{f,abc} = L_f \frac{dif_{,abc}}{dt} + E_{s,abc} \quad (7)$$

از آنجا که جریان طرف ac اینورتر خاصیت سلفی دارد برای جلوگیری از قطع جریان باید در هر لحظه در هر پایه یک سوئیچ روشن باشد.

تابع کلید زنی بصورت زیر تعریف می شود:

$$S_i^+ = \begin{cases} 1 & T_i^+ ON \\ 0 & T_i^+ OFF \end{cases} \quad i = a, b, c$$

تکنیک SVPWM یک روش با فرکانس کلیدزنی ثابت است. با ترکیب خطی و مناسب، از بردارهای متناظر با ولتاژ خروجی اینورتر، ولتاژ خروجی مطلوب به دست می آید. به عبارت دیگر اگر در یک پریود نمونه برداری، متوسط زمانی بردارهای مجاور با بردار مرجع u_{ref}^f (دو بردار از شش بردار u_1 تا u_6) برابر با u_{ref}^f باشد، ولتاژهای مطلوب در خروجی اینورتر ایجاد می شود و جریان مطلوب به شبکه تزریق می گردد. زمان های اعمال هر یک از این بردارها (T_1 و T_2) در یک پریود نمونه برداری (T_s) عبارتند از:

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}|u_{ref}^f|}{V_c} T_s \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}|u_{ref}^f|}{V_c} T_s \cdot \sin(\theta) \quad (9)$$

θ زاویه بین u_{ref}^f و u_i و T_0 مدت زمان اعمال بردار صفر (u_7 و u_8) می باشد. اینکه کدامیک از بردارهای u_7 یا u_8 فعال شود بر این اساس صورت می گیرد که تعداد کلیدزنی در یک سیکل نمونه برداری حداقل باشد.

۳-۲- کنترل کننده PI

شکل ۵ یک کنترل کننده PI برای فیلتر اکتیو مجازی را نشان می دهد. در این کنترل کننده، ولتاژ خازن dc خوانده شده و با ولتاژ مرجع مقایسه شده و سیگنال خطا و پس از نمونه برداری بعنوان ورودی PI در نظر گرفته می شود. کنترل کننده PI حد بالای جریان مرجع و

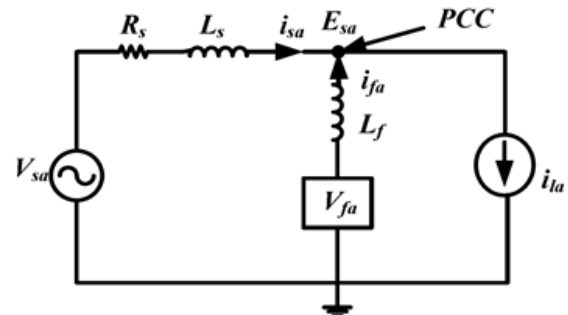
ولتاژ dc عمل می نماید. جبران سیگنال تولید شده نیز براساس کنترل کننده بردار فضایی SVPWM می باشد [۹]. جریان جبران سازی در V2G را با توجه به روابط (۱)، (۲)، (۳) بدست می آوریم.

$$i_{fa} = i_{la} - i_{sa} \quad (1)$$

$$i_{fb} = i_{lb} - i_{sb} \quad (2)$$

$$i_{fc} = i_{lc} - i_{sc} \quad (3)$$

منبع ولتاژ اینورتر با جریان کنترل شده PWM باید توانایی و کنترل جریان های هارمونیک را داشته و مدار کنترل کننده باید توانایی استخراج جریان هارمونیک از بارهای غیر خطی را در حالت های گذرا و ماندگار داشته باشد. همچنین برای خودروهایی با شارژر سه فاز با استفاده از حلقه فاز قفل شده (PLL) و کنترل کننده PI چهار چوب همسان سازی مرجع (SRF) از ولتاژ های نمونه برداری شده را انجام می دهد و استراتژی کلیدزنی لازم را برای جبران سازی به سیگنال گیت ارائه می دهد [۱۰]. در توپولوژی ارائه شده برای V2G، تئوری SRF برای استخراج جریان هارمونیک و ارسال سیگنال به DSP و تولید سیگنال SVPWM برای کلید زنی به کار برده شده است. شکل ۴، یک فاز از مدار معادل را برای توصیف V2G در شکل ۳ را نشان می دهد.



شکل ۴: مدار معادل تکفاز توپولوژی V2G در نقطه اتصال [۴]

در مدار تکفاز معادل V_{sa} و i_{sa} منبع ولتاژ و منبع جریان و R_s, L_s اندوکتانس و مقاومت داخلی منبع می باشند. E_{sa} نیز ولتاژ نقطه اتصال مشترک در فاز A است. i_{fa} و V_{fa} و L_f ، به ترتیب ولتاژ، جریان و اندوکتانس اینورتر و i_{la} جریان بار غیرخطی می باشد. شبکه تکفاز بالا را بصورت V_{fa} و i_{fa} فرمول بندی شده است:

$$V_{fa} = L_f \frac{di_{fa}}{dt} + E_{sa} \quad (4)$$

$$V_{fb} = L_f \frac{di_{fb}}{dt} + E_{sb} \quad (5)$$

pll_a, pll_b, pll_c بصورت سه فاز بیان شده است. این الگوریتم براساس توان اکتیو لحظه ای سه فاز بصورت رابطه (۱۱) بیان می شود:

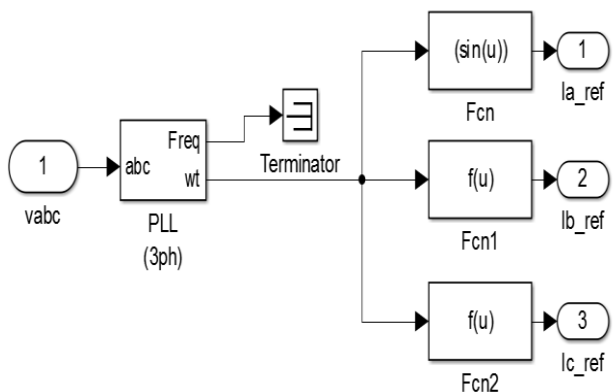
$$P_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (11)$$

سیگنال های فیدبک جریان، $i_a(\omega t) = S(\omega t)$ و $i_c(\omega t) = \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$ بوسیله PLL و انتگرال زمان خروجی ω محاسبه و کنترل کننده انتگرالگیر ساخته می شود، که دارای دامنه واحد بوده و جریان ها نسبت به هم 120° درجه اختلاف فاز دارند. سنکرون ساز PLL هنگامی به نقطه پایداری می رسد که ورودی $P_{3\phi}$ از کنترل کننده PI دارای میانگین با ارزش صفر باشد ($P_{3\phi} = 0$) و حداقل فرکانس نوسان در ولتاژ سه فاز وجود داشته باشد.

$$pll_a = \sin(\omega t - \pi/2) \quad (12)$$

$$pll_b = \sin(\omega t - \pi/2 - 2\pi/3) \quad (13)$$

$$pll_c = \sin(\omega t - \pi/2 + 2\pi/3) \quad (14)$$



شکل ۶: بلوک دیاگرام PLL

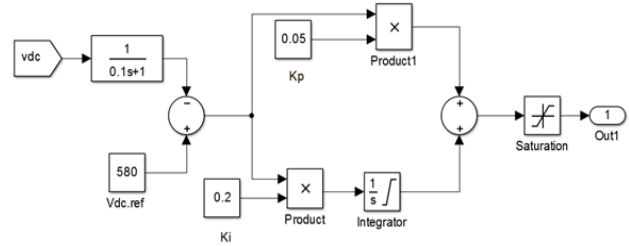
۴- نتایج شبیه سازی

تجزیه و تحلیل مدولاسیون بردار فضایی (SVPWM) در کنترل کننده مبدل توان سه فاز V2G انجام شد. نتایج شبیه سازی میزان تأثیر نفوذ V2G را بر شبکه قدرت با تکنیک SVPWM نشان می دهد. شکل موج ولتاژ، جریان سمت بار و منبع سه فاز و همچنین THD% در باس مورد نظر بدون حضور خودروی V2G در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به استاندارد IEEE-519 هارمونیک کل و هارمونیک هر مولفه نباید به ترتیب از مقدار ۵٪ و ۳٪ تجاوز نماید [۱۱].

ولتاژ خازن dc را در سمت منبع اینورتر به عهده دارد، که تابع انتقال آن بصورت رابطه (۱۰) می باشد:

$$H(S) = K P + \frac{K I}{S} \quad (10)$$

که $[K P = 0.05]$ ثابت نسبی به عنوان تعیین کننده پاسخ دینامیکی کنترل ولتاژ سمت dc و $[K I = 0.2]$ به عنوان ثابت یکه سازی، تعیین کننده زمان نشست می باشد. کنترل کننده انتگرالگیر متناسب با خطای حالت ماندگار در ولتاژ سمت dc می باشد.



شکل ۵: شماتیک کنترل کننده PI در نرم افزار متلب

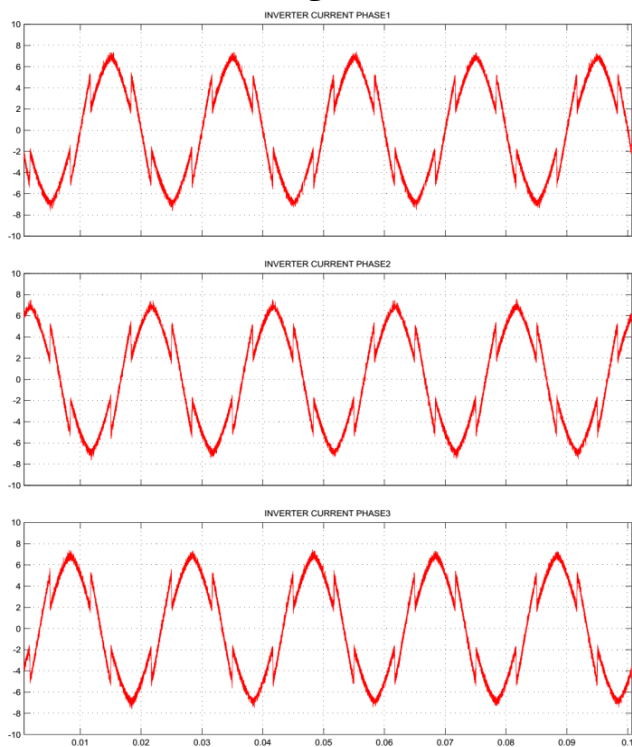
۳-۳- سنکرون سازی حلقه قفل شده فاز

حلقه قفل شده فاز (PLL) سیستم کنترلی حلقه بسته ای است که سیگنالی با فرکانس و زاویه فاز سیگنال ورودی تولید می کند. قسمت های داخلی PLL را می توان به آشکارساز فاز، نوسانساز متغیر و مسیر فیدبک تقسیم کرد. PLL فرکانس و زاویه فاز نوسانساز داخلی خود را تا زمانی که با فرکانس و زاویه فاز سیگنال ورودی یکی نشده تغییر می دهد و از این طریق به تغییرات سیگنال ورودی پاسخ می دهد. زاویه فاز سیگنال ورودی با فیدبک خروجی نوسانساز مقایسه می شود و متناسب با اختلاف بین زاویه فاز ورودی و خروجی سیگنال خطا تولید می شود. خروجی آشکارساز فاز شامل مولفه های هارمونیک است که توسط فیلتر پایین گذر عبور داده می شوند.

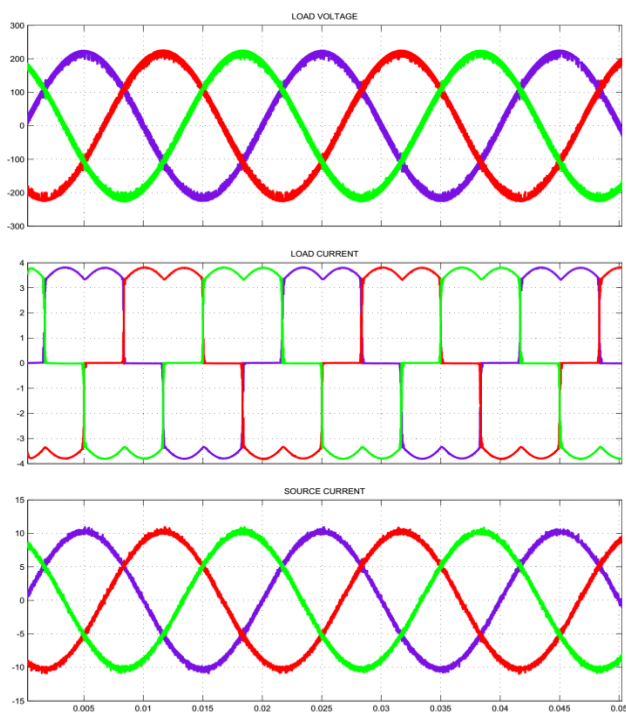
ولتاژ کنترل شده خروجی حلقه فیلتر (که تابعی از فرکانس می باشد) وارد نوسانساز شده و یک فاز خروجی تولید می کند. این سیگنال خروجی (که به شکل زاویه فاز می باشد) با یک فیدبک منفی به آشکارساز فاز برمی گردد. خروجی اسیلاتور با ورودی مقایسه می شود، اگر فرکانس آنها متفاوت بود فرکانس اسیلاتور تغییر می کند تا با فرکانس ورودی برابر شود. با استفاده از PLL می توان شبکه را از اعوجاج و ولتاژ های نامتعادل مصون داشت [۶]. PLL بطور خودکار فرکانس سیستم و مولفه های مثبت سه فاز ولتاژ های $(V_{ab} = V_{sa} - V_{sb})$ و V_{cb} ($V_{cb} = V_{sc} - V_{sb}$) را محاسبه می نماید. خروجی PLL در قالب

اولین کنفرانس ملی مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد لنگرود

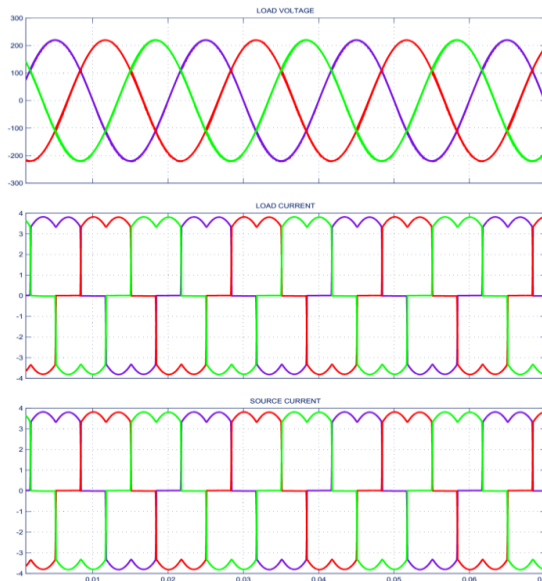
شبیه سازی شده است که توان اکتیو و توان راکتیو را به ترتیب بر حسب KW و KVAR نشان می دهند.



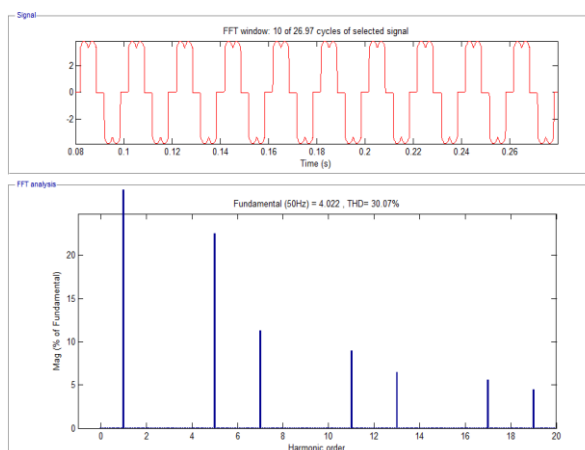
شکل ۹: جریان جبران سازی اینورتر سه فاز V2G



شکل ۱۰: ولتاژ و جریان سه فاز پس از اتصال V2G



شکل ۷: ولتاژ و جریان سه فاز قبل از اتصال V2G



شکل ۸: درصد کل هارمونیک قبل از جبران سازی V2G

هنگامی که V2G به شبکه متصل می گردد، جریان جبران سازی مرجع توسط کنترلر تولید می شود. این جریان تزریقی توسط اینورتر خودرو در شکل ۹ نشان داده شده است. جریان جبران سازی شده میکروگرید در نقطه اتصال مشترک (PCC) خودروی V2G در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شبیه سازی ها بیانگر عملکرد مطلوب خودروی V2G در کاهش هارمونیک شبکه و افزایش کیفیت توان و بهبود ضریب توان شبکه می باشد. شکل ۱۱ مجموع کل هارمونیک را در نقطه اتصال خودرو V2G به شبکه نشان می دهد. نتایج نشان دهنده کاهش میزان هارمونیک از ۳۰/۰۷٪ به ۰/۴٪ می باشد. در شکل ۱۲ میزان توان اکتیو و راکتیو شبکه در لحظه اتصال خودرو V2G در زمان ۰/۱ ثانیه

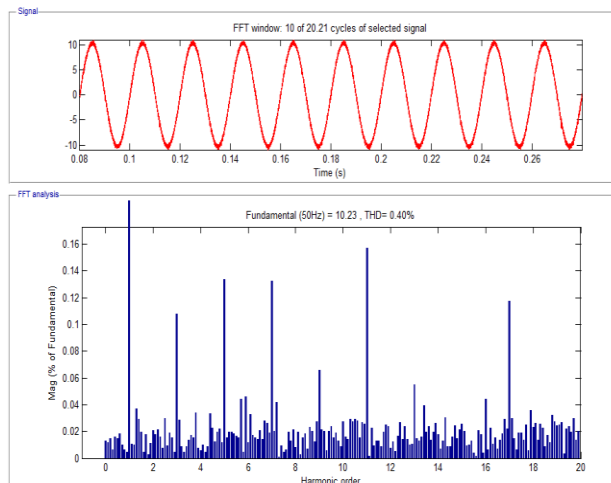
تست انجام پذیرفت. نتایج بیانگر آن است، با توجه به این که خودروهای الکتریکی متصل به شبکه مدت زمان زیادی از شبانه روز در وضعیت پارک قرار می گیرند، گزینه مناسبی جهت استفاده به عنوان کاهنده هارمونیک و تلفات توان و افزایش ضریب توان در یک میکروگرید محلی با مدیریت جمع کننده ها در بازار خدمات جانبی و کاهش هزینه می باشد.

۶- سپاسگزاری

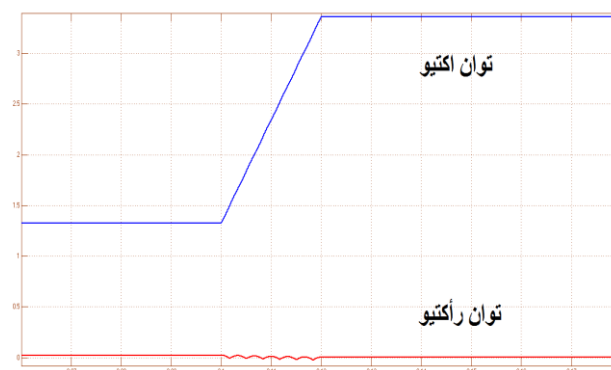
این پژوهش به پشتیبانی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس صورت پذیرفته است.

۷- مراجع

- [1] M. Falahi and H. Ming Chou, "Potential Power Quality Benefits of Electric Vehicles" *IEEE Trans. Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 4, pp.1016-1023, 2013
- [2] "Hybrid Cars," Available: <http://www.hybridcars.com/>
- [3] Kempton W, Tomić J. Vehicle to grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue. *J Power Sources* 144:268–79, 2005.
- [4] Guille C, Gross G. A conceptual framework for the vehicle to grid V2G implementation. *Energy Policy*, 37(11):4379–90, 2009.
- [5] Kempton W, Tomić J. Vehicle to grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large scale renewable energy. *J Power Sources*, 144(1):280–94, 2005.
- [6] Islam FR, Pota HR. V2G technology to improve wind power quality and stability. In: Australian control conference (AUCC); p. 452–457, 2011.
- [7] M. Khodayar and L. Wu, "Hourly Coordination of Electric Vehicle Operation and Volatile Wind Power Generation in SCUC" *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, VOL. 3, NO. 3, 2012.
- [8] N.W.A. Lidula, A.D. Rajapakse, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems" *ScienceDirect. Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 186-202, 2011.
- [9] O V S R. Varaprasad and D V S S. Siva Sarma, "An Improved SVPWM based Shunt Active Power Filter for Compensation of Power System Harmonics", *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), IEEE 16th Int Conf on. Bucharest*, 571-575, 2014
- [10] Karuppanan. P and Kamala Kanta Mahapatra "A Novel Active Power Line Conditioners using PLL synchronization and PI Controller," *International Conference on Future Engineering Trends (ICFET-2010)*
- [11] IEEE Recommended practices for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519, 1992.



شکل ۱۱: درصد کل هارمونیک پس از جبران سازی



شکل ۱۲: توان اکتیو و راکتیو در نقطه اتصال V2G

۵- نتیجه گیری

در این مقاله استراتژی جدید شارژر خودروهای الکتریکی قابل اتصال به شبکه میکروگرید با قابلیت افزایش کیفیت توان و کاهش هارمونیک در شبکه، مورد بررسی قرار گرفت. مدل شارژر پیشنهادی از نوع اینورتر ac به سه فاز تمام موج بوده که عمل شارژر و دشارژر باتری را در طول عملکرد خود انجام می دهد. کنترل این مبدل توسط SVPWM با توجه به نمونه برداری ولتاژ توسط PLL و تبدیل آن به جریان مرجع صورت گرفت که نتایج قابل قبولی را در بهبود کیفیت توان شبکه در لحظه اتصال خودرو به شبکه و تزریق جریان نشان داد. در سمت دیگر اینورتر سه فاز، مبدل دوسویه dc به dc، برای وضعیت شارژ و دشارژر باتری خودرو به واسطه خازن dc که عمل کنترل ولتاژ و جبران سازی کیفیت توان را بر عهده دارد، متصل شده است. شبیه سازی ها در محیط Simulink نرم افزار Matlab در یک شبکه