

## طراحی و شبیه سازی اینورتر تکفاز متصل به شبکه جهت سیستم فتوولتائیک 1kw با مصارف خانگی

مهدی نبی<sup>۱</sup>، مجید دهقانی<sup>۲</sup>

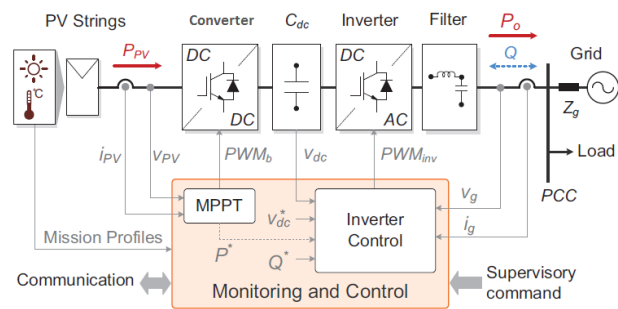
<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، mahdinabi28@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، dehghani@pel.iaun.ac.ir

چکیده - در این مقاله ساختار یک اینورتر تکفاز متصل به شبکه جهت سیستم های فتوولتائیک 1KW خانگی را ارائه می دهیم. از این رو نسبت به طراحی کانورتر افزایش ولتاژ، اینورتر و مدار کنترل آن، فیلترینگ دقیق جهت اتصال به شبکه برق شهری و نحوه کنترل توان تحویلی به شبکه اقدام می کنیم. از ویژگی های این اینورتر استفاده از حداقل المان ها، سادگی در مدار قدرت و کنترل، در نظر گرفتن شرایط MPPT و ایمنی سیستم می باشد. در انتها بررسی میزان ولتاژ، جریان، متوسط توان، سطح هارمونیک ها و THD جریان خروجی با استفاده از نرم افزار شبیه سازی Orcad انجام شده است.

کلید واژه - اینورتر، فتوولتائیک، فیلتر، کانورتر، هارمونیک

کاهش وزن، اندازه، قیمت و هزینه بهره برداری باعث افزایش راندمان کل سیستم و پیک سایی از شبکه سراسری در ساعات روز می گردد. [2] شکل ۱ شمای کلی از یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه تکفاز و مدار کنترل و منیترینگ آن را نشان می دهد. [3]



شکل ۱: نمای کلی از سیستم فتوولتائیک تکفاز متصل به شبکه

### ۱- مقدمه

با توجه به نیاز روز افزون جهان به انرژی و همچنین محدود بودن منابع انرژی فسیلی ضرورت استفاده از انرژی های تجدید پذیر را بیش از پیش آشکار می سازد. انرژی خورشیدی یکی از مهمترین انرژی های تجدید پذیر است که کشور ایران با تابش بیش از  $4.5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$  زمینه ای مستعد در جذب و تبدیل این انرژی لایتناهی به الکتریسیته را دارد. لذا با توجه به مصوبات جدید شرکت توانیر جهت حمایت از تولید انرژی از منابع تجدید پذیر بخصوص برق خورشیدی سیستم های متصل به شبکه تکفاز خانگی و تجاری، طراحی، ساخت و اجرای سیستم های فتوولتائیک تکفاز بهینه شده، ساده و مقرون به صرفه ضروری به نظر می رسد. [1][2]

### ۲-۱- مدار معادل سلول و بانل خورشیدی

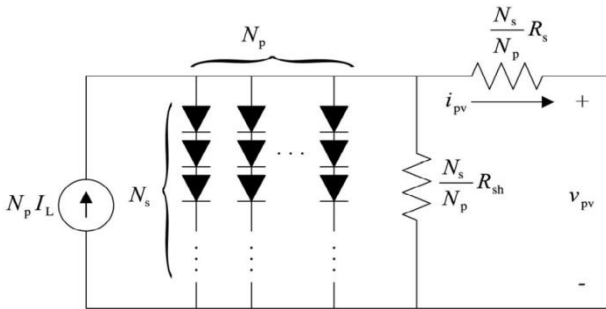
سلول فتوولتائیک در واقع مجموعه ای از پیوندهای p-n می باشد که با تابش نور خورشید به آن جریان الکتریکی در آنها سرازیر می گردد. شکل ۲ مدار معادل یک سلول فتوولتائیک را نشان می دهد که تشکیل شده از یک منبع جریان  $I_L$  متاثر از میزان تابش نور خورشید، مقاومت موازی  $R_{sh}$ ، مقاومت سری  $R_s$  و دیود موازی با جریان  $I_{ON}$  که در معادله ۱ آورده شده است. [4]

$$I_L = I_s [\exp(\alpha(v_{pv} + R_s i_{pv})) - 1] \quad (1)$$

### ۲- سیستم فتوولتائیک تکفاز متصل به شبکه

به طور کلی سیستم های فتوولتائیک تکفاز بر دو نوع مستقل از شبکه (Stand Alone) با قابلیت ذخیره سازی و بازیابی انرژی الکتریکی در باتری و متصل به شبکه برق سراسری (On-Grid) طراحی می شوند ولی در عمل اکثر سیستم های فتوولتائیک مگر در مناطق صعب العبور و فاقد شبکه برق سراسری، به صورت متصل به شبکه اجرا می گردند. با توجه به حذف باتری در سیستم های فتوولتائیک متصل به شبکه علاوه بر

۲۰۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

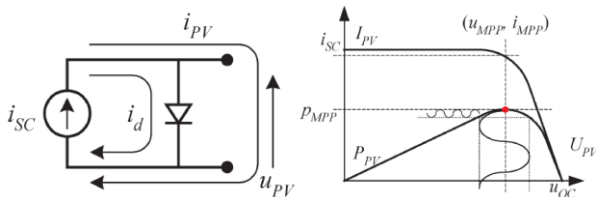


شکل ۳: مدار معادل پانل فتوولتائیک

در شکل ۲ \$N\_p\$ به عنوان تعداد رشته موازی شده و \$N\_s\$ تعداد سلول سری شده در هر رشته است. معادله ۵ حاکم بر مدار معادل پانل فتوولتائیک می باشد. [4]

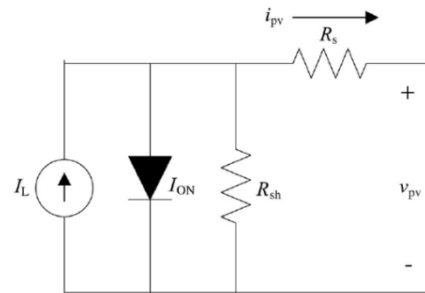
$$i_{pv} = N_p I_L - N_p I_s \left[ \exp \left[ \alpha \left( \frac{v_{pv}}{N_s} + \frac{R_s i_{pv}}{N_p} \right) \right] - 1 \right] - \frac{N_p}{R_{sh}} \left( \frac{v_{pv}}{N_s} + \frac{R_s i_{pv}}{N_p} \right) \quad (5)$$

بر اساس معادلات ۱ تا ۵ و شکل ۴ مشخص است که جریان و توان خروجی پانل فتوولتائیک به شرایط محیطی یعنی تابش و دما وابسته است و نیاز است تا در یک سیستم فتوولتائیک برای رسیدن به راندمان ماکزیمم همواره بیشترین توان ممکنه توسط مدار اینورتر از پانل فتوولتائیک دریافت شود. فرآیند دریافت بیشینه توان از سلول فتوولتائیک که به روش های مختلفی انجام می شود را اصطلاحاً برآورد شرایط MPPT می گویند.



شکل ۴: مدار معادل سلول فتوولتائیک و نمودار توان آن

امروزه پانل ها بر دو نوع کریستالی در توان های متعدد و لایه نازک در بازار وجود دارد در حالیکه پانل های کریستالی مرسوم ترند آنچه که در انتخاب پانل ها مهم هستند برخورداری از کلاس نوع A، راندمان حداقل ۱۴٪ برای پانل های کریستالی و ۹٪ برای پانل های لایه نازک، ضریب پری (Filled Factor) بیش از ۷۰٪، قابلیت تحمل بار استاتیکی حداقل  $4 \text{ N/m}^2$  و تحمل شرایط محیطی را داشته باشد و همچنین مجهز به دیود بایپاس و سد کننده باشند و نیز حداقل توان ۱۵۰ وات و در کل دارای استاندارد های IEC 61215-646-730-731 باشند. [4]



شکل ۲: مدار معادل سلول فتوولتائیک

در معادله ۱  $\alpha = q/kT_c$  که  $k=1.3807 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  ثابت بولتزمن،  $q=1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$  میزان شارژ الکترون،  $T_c$  دمای سلول بر حسب کلوین،  $A$  ضریب ایده آلی پیوند p-n که بین ۱ تا ۵ متغیر می باشد،  $I_s$  جریان اشباع،  $v_{pv}$  و  $i_{pv}$  جریان و ولتاژ خروجی سلول فتوولتائیک می باشد با توجه به شکل ۲ و استفاده از روابط KCL جریان خروجی سلول را به صورت معادله ۲ نوشت.

$$i_{pv} = I_L - I_s \left[ \exp \left( \alpha (v_{pv} + R_s i_{pv}) \right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + R_s i_{pv}}{R_{sh}} \quad (2)$$

در این رابطه جریان منبع متاثر از تابش نور خورشید تحت معادله ۳ قابل محاسبه است. [4]

$$I_s = [I_{sc} + k_i (T_c - T_{ref})] \frac{s}{1000} \quad (3)$$

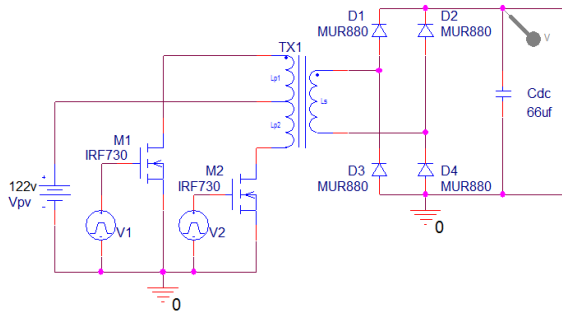
در این رابطه  $I_{sc}$  جریان اتصال کوتاه،  $k_i$  ضریب جریان اتصال کوتاه سلول،  $s$  میزان تابش نور خورشید و  $T_{ref}$  دمای مبنای سلول می باشد. مشخص است که جریان اشباع  $I_s$  وابسته به دما متغیر است و با توجه به معادله ۴ قابل محاسبه می باشد. [4]

$$I_s = I_{RS} \left[ \frac{T_c}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{Ak} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (4)$$

در معادله ۴  $E_g$  انرژی باند گذار نیمه هادی استفاده شده در ساخت سلول خورشیدی و  $I_{RS}$  جریان اشباع معکوس پیوند در دما و تابش مبنا می باشد. برای بالا بردن ولتاژ خروجی سلول خورشیدی نیاز است تا تعدادی از سلول های خورشیدی به صورت سری به یکدیگر متصل شده تا ولتاژ مورد نیاز تامین شود همچنین جهت تامین توان های بالاتر رشته های سری شده با هم موازی می شوند. از طرفی برای محافظت سلول ها در برابر عوامل محیطی و ضربات مکانیکی آنها را در کنار یکدیگر در یک پکیج از جنس شیشه یا پلاستیک قرار می دهند و به این ترتیب پانل فتوولتائیک تشکیل می شود. شکل ۳ مدار معادل یک پانل فتوولتائیک را نشان می دهد. [4]

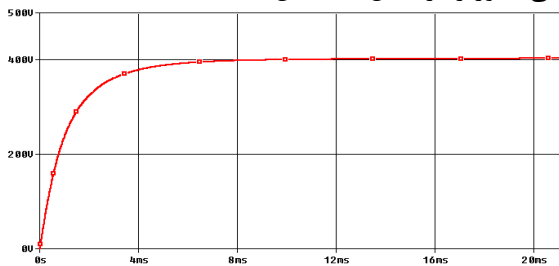
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

رو با توجه به  $f_{grid}=50\text{ hz}$  و  $u_C$  برای پانل ها ۳ ولت و برای خروجی کانورتر ۲۰ ولت، مقادیر  $C_{pv}=4.35\text{ mf}$  و  $C_{DC}=66\text{ uf}$  قابل محاسبه می باشد. مدار طراحی شده در نرم افزار Orcad در شکل ۶ نمایش داده شده است



شکل ۶: مدار کانورتر

با توجه به شکل ۶ به جای مجموعه پانل ها و خازن  $C_{pv}$  و جهت سهولت شبیه سازی از یک منبع ولتاژ dc با ولتاژ ۱۲۲ ولت، ترانسفورماتور دارای سیم پیچ سه سر در طرف اولیه علاوه بر اینکه بعنوان المان افزایش دهنده ولتاژ و نیز المان جداکننده ایفای نقش می کند وظیفه ایجاد شرایط MPPT و ایجاد ولتاژ DC ۴۰۰ ولت ثابت در خروجی خود را با روش کنترل PWM روی سوئیچ ها بر عهده دارد. در این روش ولتاژ و جریان خروجی پانل ها و نیز نمونه ولتاژ خروجی کانورتر به عنوان پارامترهایی که عرض پالس مربعی فرکانس بالای اعمالی به دو ترانزیستور ماسفت فرکانس بالا را مشخص می کند. نمودار سیگنال خروجی کانورتر در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷: ولتاژ خروجی کانورتر

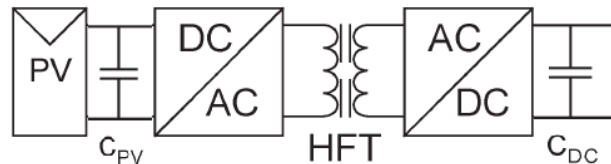
### ۲-۳- اینورتر dc-ac و مدار کنترل SPWM

وظیفه اصلی تبدیل ولتاژ DC خروجی کانورتر به ولتاژ AC را مدار اینورتر انجام می دهد با توجه به شکل ۸ مدار پیشنهادی یک اینورتر تمام پل متشکل از چهار ترانزیستور ماسفت فرکانس بالا که توسط مدار کنترل با مدولاسیون SPWM سوئیچ می شود در روش مدولاسیون SPWM یک موج مثلثی یا دندانه اریه ای به

پانل انتخاب شده برای این مقاله پانل ۲۵۰ وات کریستالی شرکت YINGLI SOLAR مدل YL250P-29b می باشد که دارای ولتاژ و جریان نامی 30.4V و 8.24A می باشد. برای سیستم فتوولتائیک 1KW نیاز است تا ۴ عدد از این نمونه پانل به صورت سری شده استفاده گردد.

### ۲-۲- کانورتر افزایش دهنده ولتاژ dc-dc با کنترل PWM

با توجه به پائین بودن ولتاژ خروجی پانل های انتخابی و همچنین موجود در بازار (زیر ۵۰ ولت) و نیز اتصال آن ها به شبکه برق شهری نیاز است تا ولتاژ خروجی پانل های فتوولتائیک به اندازه کافی برای اتصال به شبکه از طریق اینورتر بالا باشد لذا لازم است تا اولاً با اتصال پانل ها به صورت سری به یکدیگر و تشکیل رشته ای از پانل ها ولتاژ dc خروجی رشته پانل ها را تا حد امکان بالا برد ولی با این وجود ولتاژ نامی خروجی ۱۲۲ ولت خواهد بود لذا نیاز است تا با استفاده از مدار یک کانورتر (Converter) افزایش دهنده ولتاژ نسبت به افزایش سطح ولتاژ تا مقدار مطلوب ۴۰۰ ولت اقدام کرد. شمای کلی کانورتر پیشنهادی در شکل ۵ نمایش داده شده است. [5][6]



شکل ۵: شمای کلی از کانورتر به همراه خازن های کوپلاژ

از ویژگی های کانورتر پیشنهادی استفاده از ترانسفورماتور فرکانس بالا جهت افزایش ولتاژ از سطح ۱۲۲ ولت به ۴۰۰ ولت ثابت، کنترل آسان جهت دریافت توان  $P_{MPP}$  از پانل ها و همچنین جداسازی زمین سمت پانل ها از زمین سمت شبکه برای بالا بردن ایمنی سیستم و جلوگیری از برق گرفتگی می باشد، همچنین با استفاده از خازن های کوپلاژ  $C_{pv}$  و  $C_{DC}$  جریان کشیده شده از پانل ها و مدار یکسو ساز دیودی کانورتر پیوسته خواهد بود. مقادیر این خازن ها طی معادله ۶ قابل محاسبه می باشد. [6][7][8]

$$C = \frac{P_{pv}}{2 \cdot \omega_{grid} \cdot U_C \cdot u_C} \quad (6)$$

در معادله ۶  $P_{pv}$  توان MPP مجموعه پانل ها،  $\omega_{grid}=2\pi f_{grid}$  ولتاژ خازن و  $u_C$  ولتاژ ریپل قابل قبول خازن می باشد. از این

با فرض  $R_1=R_2=0$  معادلات ۷ و ۸ به ترتیب معادله مدار معادل فیلتر و فرکانس تشدید  $\omega_{res}$  می باشد. [10]

$$G(s) = \frac{i_2(s)}{v_1(s)} \Big|_{v_2=0} \quad (7)$$

$$= \frac{R_3 C_f s + 1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2) R_3 C_f s^2 + (L_1 + L_2) s}$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (8)$$

در طراحی المان های فیلتر مذکور به چند نکته باید دقت شود

- (الف) - مقدار کل اندوکتانس فیلتر باید کمتر از 0.1(p.u) باشد در غیر اینصورت باعث افت ولتاژ ac خواهد شد.
- (ب) - مقدار خازن توسط ضریب قدرت توان راکتیو محدود می شود.
- (ج) - فرکانس تشدید باید در رنج  $10\omega_0 \leq \omega_{res} \leq \omega_{sw}/2$  قرار بگیرد تا مشکلات تشدید اتفاق نیافتد.

با توجه به شرایط مذکور در بالا و با فرض  $PF=1$  المانهای فیلتر T LCL طی معادلات ۹ تا ۱۲ قابل محاسبه می باشد. [8]

$$L = \frac{V_{dc}}{4I_{rated} \Delta_{ripple} f_s} (1-m)m \quad (9)$$

$$L_1 = aL_2 \quad (10)$$

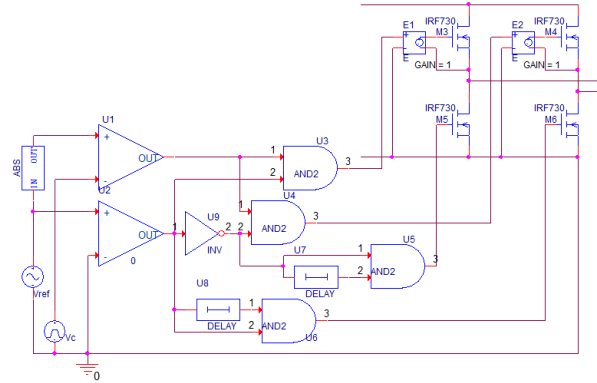
$$C_f = \frac{Q_{re}}{\omega_s V_{rated}^2} = \frac{\alpha P_{rated}}{\omega_s V_{rated}^2} \quad (11)$$

$$R_3 = \frac{1}{3\omega_{res} C_f} \quad (12)$$

در این معادلات L کل اندوکتانس فیلتر  $(L_1+L_2)$ ،  $I_{rated}$  میزان جریانی که در توان نامی سیستم می تواند به شبکه تزریق کند،  $\Delta_{ripple}$  ماکزیمم درصد دامنه ریپل ولتاژ (۵٪ تا ۲۵٪)،  $V_{dc}$  ولتاژ خروجی کانورتر،  $f_s$  فرکانس سوئیچینگ اینورتر، m ضریب مدولاسیون، a ضریب اندوکتانس ( $1 \leq a$ )،  $Q_{re}$  میزان جذب توان راکتیو توسط خازن،  $P_{rated}$  توان نامی سیستم فتوولتائیک،  $\alpha$  ضریب توان راکتیو (۵٪)،  $m=0.7$  و  $V_{rated}$  ولتاژ شبکه می باشد. [10]

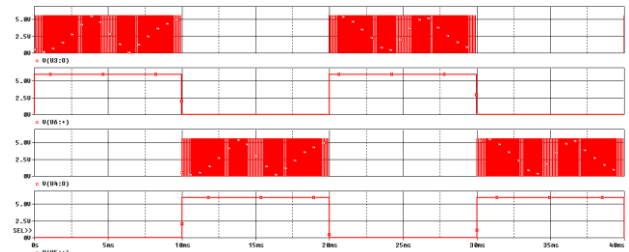
لذا با توجه به مطالب بالا و  $w_0=100\pi$ ،  $P_{rated}=1000W$  و  $\Delta_{ripple}=10\%$ ،  $I_{rated}=4.35A$ ،  $V_{rated}=230V$ ،  $V_{dc}=400V$  و  $\alpha=2.5\%$  مقادیر المان های مدار پیشنهادی عبارتند از:  
 $R_3=6.5\Omega$  و  $C_f=1.5\mu f$ ،  $L_2=0.8mH$ ،  $L_1=1.6mH$

عنوان کریر (carrier) و یک موج سینوسی نمونه از ولتاژ شبکه به عنوان مرجع (refrence) به یک مقایسه کننده اعمال می شود و نتیجه خروجی مقایسه کننده موج PWM با فرکانس موج سینوسی و عرض پالس وابسته به ضریب مدولاسیون  $m=V_{ref}/V_c$  که برابر نسبت دامنه موج سینوسی به موج مثلثی می باشد خواهد بود. [6][7][8][9]



شکل ۸: مدار اینورتر تمام پل و مدار کنترل SPWM

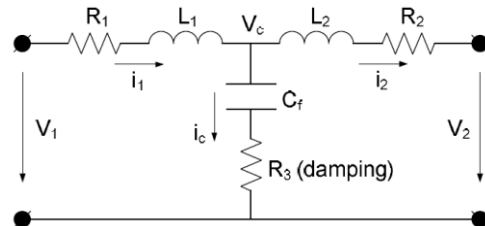
فرکانس موج سینوسی مرجع برابر 50hz و فرکانس موج مثلثی 20khz انتخاب شده است. در نمودار شکل ۹ فرمان گیت ماسفت های مدار اینورتر نمایش داده شده است.



شکل ۹: فرمان گیت ماسفت های مدار اینورتر

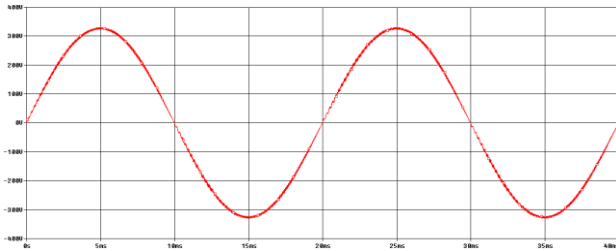
## ۲-۴ - فیلتر T LCL

برای اتصال خروجی اینورتر به شبکه برق نیاز است تا فیلتر مناسبی که توانایی در یافت موج SPWM در ورودی خود و تبدیل آن به موج سینوسی را داشته باشد. مدار فیلتر T LCL شکل ۱۰ برای این منظور طراحی شده است. [8][9][10]

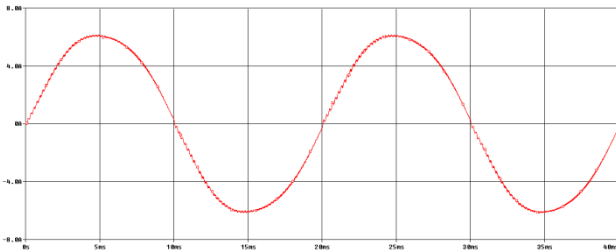


شکل ۱۰: مدار معادل فیلتر T LCL

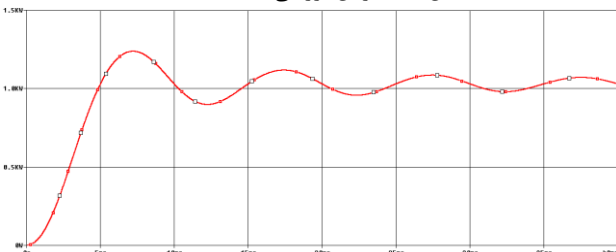
همچنین در شکل ۱۲ تا ۱۵ به ترتیب نمودار ولتاژ دو سر خازن  $C_f$  به عنوان ولتاژ خروجی  $v_g$ ، جریان تزریقی به شبکه، متوسط توان تزریقی به شبکه و نمودار FFT جریان  $i_g$  نمایش داده شده است.



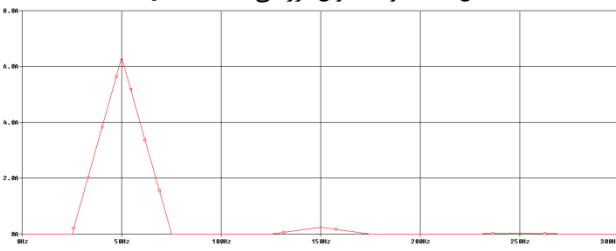
شکل ۱۲: ولتاژ دو سر خازن  $C_f$



شکل ۱۳: جریان تزریقی به شبکه ( $i_g$ )



شکل ۱۴: متوسط توان تزریقی به شبکه ( $P_g$ )



شکل ۱۵: نمودار FFT جریان  $i_g$

همچنین با توجه به نمودار FFT شکل ۱۵ اندازه مولفه اول جریان  $i_g$  برابر 6.4A و از طرفی دامنه جریان  $i_g$  برابر 6.1A می باشد لذا با توجه به معادله ۱۸ مقدار THD جریان  $i_g$  برابر ۰.۳٪ خواهد بود که نشان از کیفیت سیگنال جریان خروجی دارد.

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{g1}}{I_g}\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{6.3}{6.1}\right)^2 - 1} = 0.03 \quad (18)$$

## ۲-۵ - کنترل توان تزریقی به شبکه

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است توان اکتیو همواره از سمت سیستم فتوولتائیک به شبکه هدایت می شود در حالیکه توان راکتیو حالت دوطرفه دارد و سیستم فتوولتائیک ژنراتوریست که هم می تواند نقش خازن و هم نقش سلف را در شبکه ایفا کند. معادلات ۱۳ تا ۱۷ معادلات مربوط به توان سیستم فتوولتائیک تکفاز را نشان می دهد. [8][9][11]

$$v_g = V_g \cos(\omega t) \quad (13)$$

$$i_g = I_g \cos(\omega t + \phi) \quad (14)$$

$$P_g = v_g i_g = \frac{1}{2} V_g I_g [\cos(\phi) + \cos(2\omega t + \phi)] \quad (15)$$

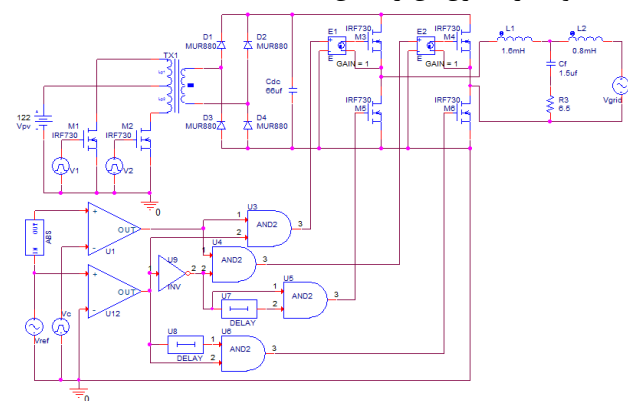
$$P_{pv} = v_{pv} i_{pv} = \frac{1}{2} V_g I_g \cos(\phi) \quad (16)$$

$$P_r = P_g - P_{pv} = \frac{1}{2} V_g I_g \cos(2\omega t + \phi) \quad (17)$$

در معادله ۱۷ پارامتر  $P_r$  توان ولتاژ ریپل می باشد. توان اکتیو تزریقی به شبکه با تغییر ضریب مدولاسیون در مدار کنترل اینورتر قابل تغییر می باشد و میزان توان راکتیو که شبکه از سیستم فتوولتائیک در خواست می کند با تغییر زاویه موج سینوسی مرجه قابل کنترل می باشد به طوری که با اضافه کردن فاز پیش فاز به آن خاصیت خازنی و با اضافه کردن فاز منفی خاصیت سلفی از خود نشان می دهد.

## ۲-۶ - شبیه سازی کل سیستم فتوولتائیک

در شکل ۱۱ مدار کل سیستم فتوولتائیک تکفاز متصل به شبکه و مدار کنترل آن را نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مدار کل سیستم فتوولتائیک

Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. p. 1659-1665.

- [11] I. T. Roman and L. S. Silva, "A single-phase current-source inverter with active power filter for grid-tied PV systems," in Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012 3rd IEEE International Symposium on, 2012, pp. 349-356.

### ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی بر آن شد تا یک سیستم فتوولتائیک تکفاز 1KW متصل به شبکه ساده با انتخاب پانل‌های فتوولتائیک مناسب و استفاده از کانورتر مجهز به ترانسفورماتور فرکانس بالا جهت جداسازی زمین اینورتر از پانل‌های فتوولتائیک و افزایش ولتاژ DC بانضمام مدار کنترلی با روش مدولاسیون PWM جهت ایجاد شرایط MPPT طراحی شد. همچنین طراحی اینورتر تمام پل با مدار کنترلی به روش مدولاسیون SPWM جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی به همراه طراحی المان‌های فیلتر مناسب جهت اتصال خروجی اینورتر به شبکه برق شهری انجام شد. در پایان طی شبیه‌سازی، پارامترهای ولتاژ، جریان، توان و THD قابل قبول سیگنال خروجی بدست آمد.

### مراجع

- [1] <http://www.tavanir.org.ir/dm/dmtozi/pages/69/index.php?active=1>.
- [2] <http://www.sun.org.ir>
- [3] Y. Yongheng, W. Huai, and F. Blaabjerg, "Reactive Power Injection Strategies for Single-Phase Photovoltaic Systems Considering Grid Requirements," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 50, no. 6, pp. 4065-4076, 2014.
- [4] M. A. Mahmud, H. R. Pota, and M. J. Hossain, "Nonlinear Current Control Scheme for a Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System," Sustainable Energy, IEEE Transactions on, vol. 5, no. 1, pp. 218-227, 2014.
- [5] E. dos Santos, and E. da Silva, "Power Electronics Converters Processing AC Voltage and Power Blocks Geometry," Advanced Power Electronics Converters: PWM Converters Processing AC Voltages, pp. 1-376: Wiley-IEEE Press, 2014.
- [6] Myrzik JMA, Calais M. "String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems - a review". Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna; 2003 p. 8 pp. Vol.2.
- [7] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, 2005.
- [8] X. Zong, "A Single Phase Grid Connected DC/AC Inverter with Reactive Power Control for Residential Application," Master's of Applied Science, Department of Electrical and Computer Engineering, Toronto University, 2011.
- [9] Z. Zhao, "High Efficiency Single-stage Grid-tied PV Inverter for Renewable Energy System," Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2012.
- [10] C. Hanju, and V. Trung-Kien, "Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter." . Applied Power Electronics Conference and