

طراحی و شبیه سازی اینورتر 1KW تکفاز متصل به شبکه جهت سیستم فتوولتائیک فاقد ترانسفورماتور و با راندمان بالا

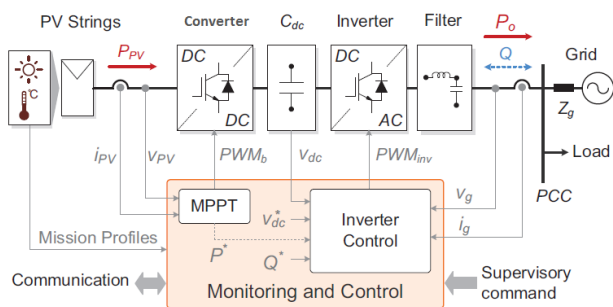
مهدی نبی^۱، مجید دهقانی^۲

^۱ دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، mahdinabi28@gmail.com

^۲ دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، dehghani@pel.iaun.ac.ir

چکیده - در این مقاله ساختار یک سیستم فتوولتائیک تکفاز متصل به شبکه با قدرت $1KW$ بدون استفاده از ترانسفورماتور افزایش ولتاژ جهت مصارف خانگی را ارائه می دهیم. لذا نسبت به طراحی کانورتر افزایش ولتاژ، اینورتر و مدار کنترل آن، فیلترینگ دقیق و نحوه کنترل توان تزریقی 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 $MPPT$ ، راندمان بالا و سطح هارمونیک قابل قبول می باشد. در انتها بررسی میزان ولتاژ، جریان، متوسط توان، راندمان، سطح هارمونیک ها و THD جریان خروجی با استفاده از نرم افزار شبیه سازی *Orcad* انجام شده است. کلید واژه - اینورتر، فتوولتائیک، فیلتر، کانورتر بوست، هارمونیک.

سراسری، به صورت متصل به شبکه اجرا می گردند. با توجه به حذف باتری در سیستم های فتوولتائیک متصل به شبکه علاوه بر کاهش وزن، اندازه، قیمت و هزینه بهره برداری باعث افزایش راندمان کل سیستم و پیک سایی از شبکه سراسری در ساعات روز می گردد. [3] شکل ۱ شمای کلی از یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه تکفاز را نشان می دهد. [4]



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

۱- مقدمه

امروزه با افزایش مصرف انرژی الکتریکی و نگرانی از اتمام منابع سوخت های فسیلی و همچنین آلودگی های زیست محیطی، ضرورت استفاده از انرژی های تجدیدپذیر را بیش از پیش آشکار می سازد. انرژی خورشیدی یکی از مهمترین انرژی های تجدیدپذیر است و کشور ایران زمینه ای مستعد در جذب و تبدیل این انرژی لایتناهی به الکتریسیته را دارد. در گذشته سهم زیادی از قیمت سیستم فتوولتائیک را پانل های خورشیدی به خود اختصاص می داد، اما امروزه با رشد تکنولوژی ساخت نیمه هادی و تولید انبوه قیمت پانل های خورشیدی کاهش یافته و قیمت یک سیستم فتوولتائیک را مدار اینورتر آن به خود اختصاص می دهد. از این رو امروزه تحقیقات گسترده ای برای طراحی و ساخت اینورتر های فتوولتائیک با کیفیت و راندمان بالا بخصوص در بخش تکفاز انجام می شود. [1][2][3]

۲-۱- مدار معادل سلول و پانل خورشیدی

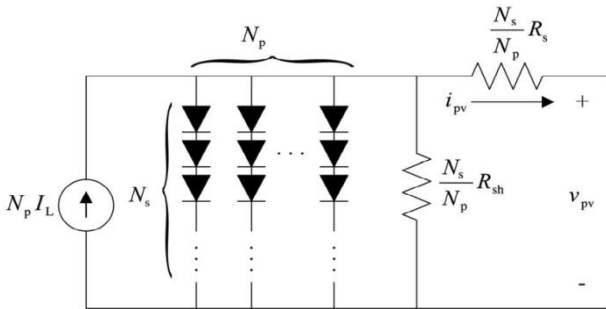
سلول فتوولتائیک در واقع مجموعه ای از پیوندهای p-n می باشد که با تابش نور خورشید به آن جریان الکتریکی در آنها سرازیر می گردد. شکل ۲ مدار معادل یک سلول فتوولتائیک را نشان می دهد که تشکیل شده از یک منبع جریان I_L متاثر از میزان تابش نور خورشید، مقاومت موازی R_{sh} ، مقاومت سری R_s و دیود موازی با جریان I_{ON} که در معادله ۲ آورده شده است. [5]

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

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

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

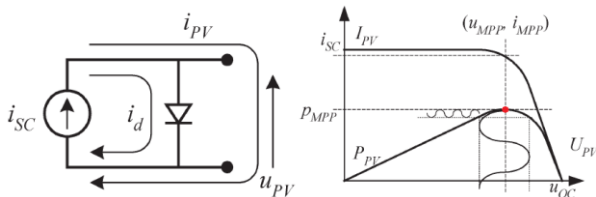


شکل ۳: مدار معادل پانل فتوولتائیک

در شکل ۲ N_p به عنوان تعداد رشته موازی شده و N_s تعداد سلول سری شده در هر رشته است. معادله ۶ حاکم بر مدار معادل پانل فتوولتائیک می باشد. [5]

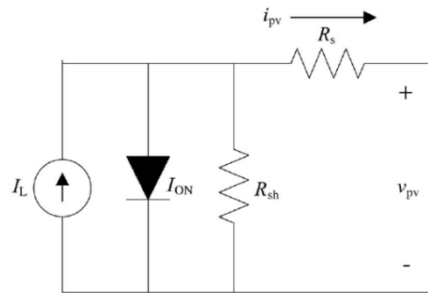
$$i_{pv} = N_p I_L - N_p I_s \left[\exp \left[\alpha \left(\frac{v_{pv}}{N_s} + \frac{R_s i_{pv}}{N_p} \right) \right] - 1 \right] - \frac{N_p}{R_{sh}} \left(\frac{v_{pv}}{N_s} + \frac{R_s i_{pv}}{N_p} \right) \quad (6)$$

بر اساس معادلات ۲ تا ۶ 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 برخوردار 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 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. [5]



شکل ۲: مدار معادل سلول فتوولتائیک

در معادله ۲ $\alpha = q/kT_c$ 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 ۳ نوشت.

$$i_{pv} = I_L - I_s \left[\exp \left(\alpha (v_{pv} + R_s i_{pv}) \right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + R_s i_{pv}}{R_{sh}} \quad (3)$$

در این رابطه جریان منبع متاثر از تابش نور خورشید تحت معادله ۴ قابل محاسبه است. [5]

$$I_s = \left[I_{sc} + k_i (T_c - T_{ref}) \right] \frac{s}{1000} \quad (4)$$

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 ۵ قابل محاسبه می باشد. [5]

$$I_s = I_{RS} \left[\frac{T_c}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (5)$$

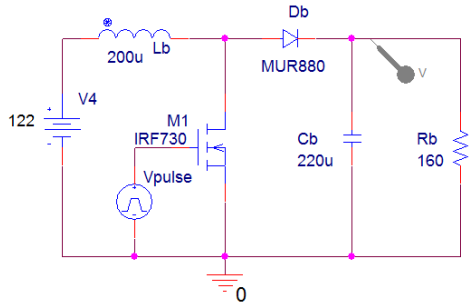
در معادله ۵ E_g انرژی باند گذار نیمه هادی استفاده شده در ساخت سلول خورشیدی و I_{RS} جریان اشباع معکوس پیوند در دما و تابش مبنا می باشد. برای بالا بردن ولتاژ خروجی سلول خورشیدی نیاز است تا تعدادی از سلول های خورشیدی به صورت سری به یکدیگر متصل شده تا ولتاژ مورد نیاز تامین شود همچنین جهت تامین توان های 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. [5]

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

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{122}{400} = 0.7 \quad (7)$$

$$L_b = \frac{V_{in} \times (V_{out} - V_{in})}{V_{out} \times f_s \times \Delta I_L} = \frac{122 \times (400 - 122)}{400 \times 20000 \times 20} \approx 200 \mu H \quad (8)$$

$$C_b = \frac{I_{out} \times D}{f_s \times \Delta V_{out}} = \frac{2.5 \times 0.7}{20000 \times 0.4} \approx 220 \mu F \quad (9)$$

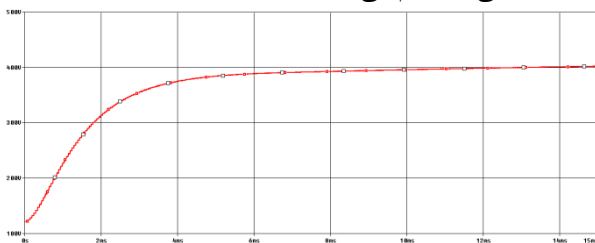


شکل ۶: مدار کانورتر

از ویژگی های کانورتر پیشنهادی

- کنترل آسان جهت دریافت توان P_{MPP} از پانل ها با روش مدولاسیون PWM می باشد. در این روش ولتاژ و جریان خروجی پانل ها و نیز نمونه ولتاژ خروجی کانورتر به عنوان پارامتر هایی که عرض پالس مربعی فرکانس بالای اعمالی به ترانزیستور ماسفت را مشخص می کند. [3]

- دارای راندمان بالا به علت عدم استفاده از ترانسفورماتور ولی به علت یک بودن زمین سمت پانل ها از زمین سمت شبکه جدا نبوده و این مسئله از میزان درجه ایمنی سیستم می کاهد. [6][7][8]



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

مشخصات پانل انتخاب شده برای این مقاله در جدول ۱ آورده شده است لذا با توجه به مشخصات پانل مذکور و تامین ۱۰۰۰ وات توان خروجی نیاز است تا ۴ عدد از این نمونه پانل به صورت سری شده استفاده گردد.

جدول ۱: مشخصات پانل فتوولتائیک انتخابی

Row	Parameter	Value
1	Manufacture	YINGLI SOLAR
2	Model	YL250P-29b
3	Application Class	A
4	Rated Max. Power	250 W
5	Rated Voltage	30.4 V
6	Open Cerciut Voltage	38.4 V
7	Rated Current	8.24 A
8	Short Cerciut Current	8.79 A

۲-۲- کانورتر بوست dc-dc با کنترل PWM

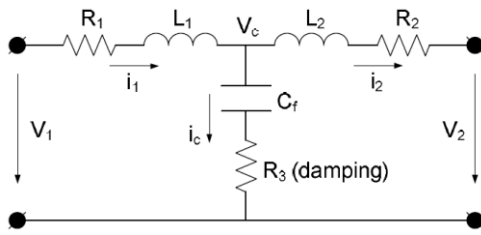
با توجه به پائین بودن ولتاژ خروجی پانل انتخابی و همچنین پانل های موجود در بازار (زیر ۵۰ ولت) و نیز اتصال آن ها به شبکه برق شهری نیاز است تا ولتاژ خروجی پانل های فتوولتائیک به اندازه کافی برای اتصال به شبکه از طریق اینورتر بالا باشد لذا لازم است تا اولاً با اتصال پانل ها به صورت سری به یکدیگر و تشکیل 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 ولتاژ نسبت به افزایش سطح ولتاژ تا مقدار مطلوب ۴۰۰ ولت اقدام کرد. جدول ۲ مقادیر پارامتر های کانورتر را مشخص می کند. [6][7]

جدول ۲: پارامتر های کانورتر مناسب

Symbol	Actual Meaning	Value
V_{in}	Input voltage	122 V
V_{out}	Output voltage	400 V
f_s	Switching frequency	20 kHz
ΔI_L	Inductor ripple current	20 A
ΔV_{out}	Output ripple voltage	0.4 V
I_{out}	Max. output current	2.5 A

با توجه به جدول ۲ مقادیر المان های مدار کانورتر بوست طی معادلات ۷ تا ۹ محاسبه می شوند و مدار طراحی شده پیشنهادی در نرم افزار Orcad در شکل ۶ نمایش داده شده است. همچنین نمودار سیگنال خروجی کانورتر در شکل ۷ نمایش داده شده است. [6][7][8]

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



شکل ۱۰: مدار معادل فیلتر T LCL

با فرض $R_1=R_2=0$ معادلات ۷ و ۸ به ترتیب معادله مدار معادل فیلتر و فرکانس تشدید ω_{res} می باشد. [12]

$$G(s) = \frac{i_2(s)}{v_1(s)} \Big|_{v_2=0} = \frac{R_3 C_f s + 1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2) R_3 C_f s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (7)$$

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

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]

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

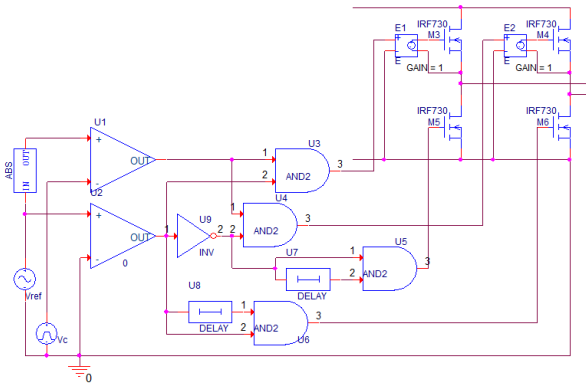
$$L_1 = aL_2 \quad (10)$$

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

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

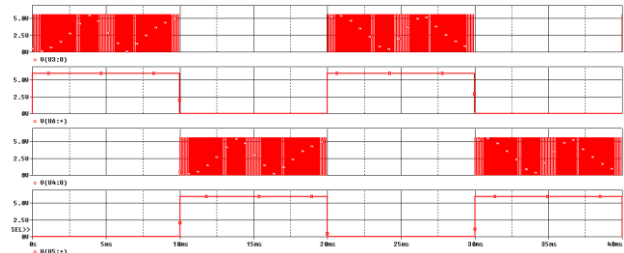
در این معادلات L کل اندوکتانس فیلتر $(L_1 + L_2)$ ، I_{rated} میزان جریانی که در توان نامی سیستم می تواند به شبکه تزریق کند، Δ_{ripple} ماکزیمم درصد دامنه ریپل ولتاژ (۵٪ تا ۲۵٪)، V_{dc} ولتاژ خروجی کانورتر، f_s فرکانس سوئیچینگ اینورتر، m ضریب مدولاسیون، a ضریب اندوکتانس $(1 \leq a)$ ، Q_{re} میزان جذب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

در روش مدولاسیون SPWM یک موج مثلثی یا دندانه اری ای به عنوان کریر (carrier) و یک موج سینوسی نمونه از ولتاژ شبکه به عنوان مرجع (reference) 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. [9][10][11]



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.

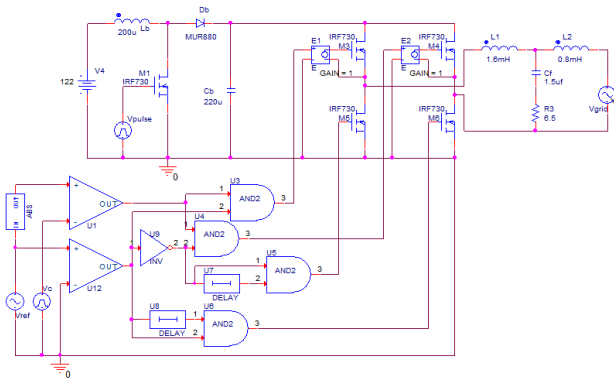


شکل ۹: فرمان گیت ماسفت های مدار اینورتر

۴-۲- فیلتر T LCL

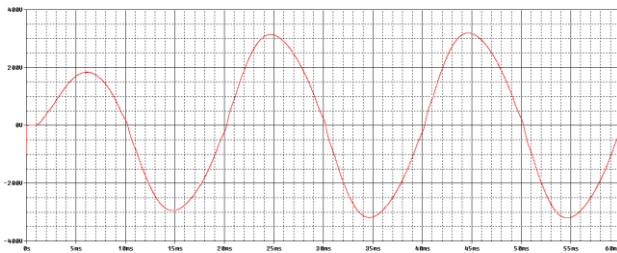
برای اتصال خروجی اینورتر به شبکه برق نیاز است تا فیلتر مناسبی که توانایی در یافت موج SPWM در ورودی خود و تبدیل آن به موج سینوسی را داشته باشد. مدار فیلتر T LCL شکل ۱۰ برای این منظور طراحی شده است. [10][11][12]

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

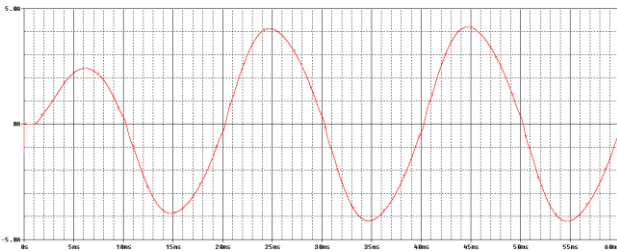


شکل ۱۱: مدار کل سیستم فتوولتائیک

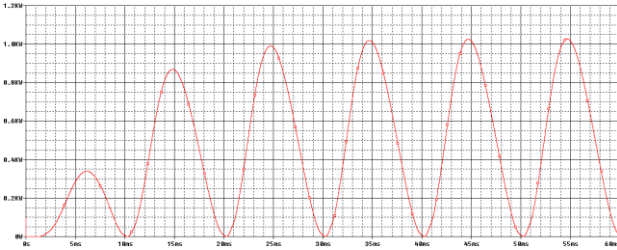
همچنین در شکل ۱۲ تا ۱۵ به ترتیب نمودار ولتاژ دو سر خازن C_f به عنوان ولتاژ خروجی v_g ، جریان i_g تزریقی به شبکه، توان تزریقی به شبکه و نمودار FFT جریان i_g نمایش داده شده است.



شکل ۱۲: ولتاژ دو سر خازن C_f



شکل ۱۳: جریان تزریقی به شبکه (i_g)



شکل ۱۴: توان تزریقی به شبکه (P_g)

۳- نتیجه گیری

در این مقاله سعی بر آن شد تا یک سیستم فتوولتائیک تکفاز 1KW متصل به شبکه ساده با انتخاب پانل های

ضریب توان راکتیو (≤ 0.7) و V_{rated} ولتاژ شبکه می باشد. [12]

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 $C_f=1.5\mu f$ ، $L_2=0.8mH$ ، $L_1=1.6mH$

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. [10][11][13]

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

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

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

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

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

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 مرجع 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.

inverter." . Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) , 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. p. 1659-1665.

- [13] 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.

فتوولتائیک مناسب و استفاده از کانورتر فاقد ترانسفورماتور جهت 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 المان های فیلتر مناسب جهت اتصال خروجی اینورتر به شبکه برق شهری انجام شد. در پایان طی شبیه سازی، پارامترهای ولتاژ، جریان، توان قابل قبول سیگنال خروجی با راندمان بالا بدست آمد.

مراجع

- [1] <http://www.tavanir.org.ir/dm/dmtozi/pages/69/index.php?active=1>.
- [2] <http://www.sun.org.ir>
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] L. An, C. Yandong, S. Zhikang, and T. Chunming, "An Improved Reactive Current Detection and Power Control Method for Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected DG System," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 823-831, 2013.
- [7] W. Sripipat and P.-N. Sakorn, "Simplified active power and reactive power control with MPPT for single-phase grid-connected photovoltaic inverters," in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference on, 2014, pp. 1-4.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] C. Hanju, and V. Trung-Kien, "Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic