

استفاده از مبدل چند سطحی ماژولار با استفاده از روش کنترل پیش‌بین در سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه

عباس کتابی^۱، دانشیار؛ شیلا صفائی^۲، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - aketabi@kashanu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران - shsafaei@grad.kashanu.ac.ir

چکیده: امروزه سیستم‌های فتوولتائیک جایگاه ویژه‌ای در شبکه‌های قدرت یافته‌اند. از آنجاکه اینورترها عناصر اصلی انتقال انرژی خورشیدی به شبکه هستند، لازم است عملکرد مطلوب و قابلیت اطمینان بالایی داشته باشند. انتخاب توپولوژی و نحوه کنترل اینورتر دو عامل مهم در رسیدن به این اهداف است. اینورترهای چندسطحی ماژولار به دلیل ویژگی‌های شاخص خود جایگزین مناسبی برای اینورترهای چندسطحی مرسوم می‌باشند. در این مقاله ساختار جدیدی از اینورتر چندسطحی ماژولار ارائه شده است. جهت کنترل هم‌زمان جریان بار، متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌ها و کاهش جریان چرخشی از روش کنترل پیش‌بین استفاده می‌شود. عملکرد مبدل در حالت ماندگار و شرایط مختلفی مانند کاهش یا افزایش ولتاژ شبکه و تغییرات فرکانس شبکه و تغییر میزان تابش بررسی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK برای تأیید کارایی این اینورتر و مقایسه با ساختار چندسطحی مرسوم ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اینورتر چندسطحی ماژولار (MMC)، کنترل پیش‌بین (MPC)، سلول خورشیدی (PV)، هارمونیک اغتشاشی کل (THD)

A Grid-connected PV System Based on Modular Multilevel Converter With Model Predictive Control Strategy

Abbas ketabi¹, Associate professor; Sheila Safae², PhD student

1- Computer and Electrical Engineering Department, Kashan university, Kashan, Iran, Email: aketabi@kashanu.ac.ir

2- Computer and Electrical Engineering Department, Kashan university, Kashan, Iran, Email: shsafaei@grad.kashanu.ac.ir

Abstract: Today, PV systems have been widely used in power networks. The important issues about them are efficiency and power quality. In this way, inverters have the important role to achieve high efficiency, control power injected into the grid and improve power quality. The selection of inverter topology and the control strategy are two necessary factors to achieve the specified performance objectives. In this way, multilevel inverters with modularity and low cost can be a good choice for the next generation of efficient and reliable solar power stations. This paper introduces the improved topology of the photovoltaic supported MMC for grid interface. To observe all the control requirements simultaneously, only with one controller, FCS-MPC is used. It satisfies the control objectives like constant power in grid voltage sag/swell, synchronizing grid utility voltage with output current and low total harmonic distortion. The validity of the proposed system and the comparison with conventional topology is confirmed by MATLAB/SIMULATION.

Keywords: Modular multilevel converter (MMC), model predictive control (MPC), photovoltaic (PV) array, total harmonic distortion (THD).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۴ و ۱۳۹۶/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۸

نام نویسنده مسئول: عباس کتابی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - بلوار قطب راوندی - دانشگاه کاشان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در تمام مطالعات قبلی از MMC به صورت یک اینورتر مرکزی استفاده شده است که تعداد زیادی مازول خورشیدی را به شبکه متصل می‌کند. در این روش چندین مازول خورشیدی به صورت سری به هم وصل شده تا بدون استفاده از ترانسفورماتور یا مبدل dc/dc به سطح ولتاژ بالاتری برسند و سپس برای رسیدن به توان بالاتر این المان‌ها موازی می‌شوند. ساختار ساده و کنترل آسان از مزایای این روش است؛ اما این ساختار محدودیت‌هایی دارد. قراردادن حجم زیادی مازول در کنار هم نصب سیستم را مشکل می‌سازد. وجود المان‌های متمرکز باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد. در صورت خرابی یا از کارافتادن گروهی از مازول‌های فتوولتاییک کل سیستم ناکارآمد می‌گردد. اگر بتوان مازول‌های فتوولتاییک را به صورت جداگانه و به عنوان منابع کوچک ولتاژ بکار گرفت می‌توان به ساختار متقارن و پربازده‌تری دست یافت.

در این مقاله به معرفی ساختار جدیدی از مبدل چند سطحی مازولار جهت استفاده در سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه می‌پردازیم که تمام اهداف کنترلی جهت عملکرد مطلوب را در حالت ماندگار، شرایط اغتشاش در شبکه، سنکرون شدن ولتاژ و جریان شبکه برای داشتن ضریب توان واحد و اغتشاش کل هارمونیکی پایین را با استفاده از روش کنترل پیش‌بین به خوبی برآورده می‌سازد. چیدمان مقاله به صورت زیر می‌باشد:

بخش دوم مدل ریاضی مبدل چندسطحی مازولار مرسوم را توصیف کرده است. در بخش سوم به معرفی مدار پیشنهادی این مبدل جهت استفاده در سیستم‌های خورشیدی می‌پردازد. بخش چهارم روش کنترل پیش‌بین را معرفی می‌کند. بخش پنجم مربوط به نتایج شبیه‌سازی بوده و نتیجه‌گیری در بخش ششم ارائه می‌گردد.

۲- مدل ریاضی مبدل چند سطحی مازولار

شکل (۱) یک MMC سه‌فاز را نشان می‌دهد. هر فاز از دو بازو تشکیل شده است. هر بازو از n عدد زیرماژول از هر حیث یکسان و یک سلف (L) و یک مقاومت (R) سری تشکیل شده است. زیرماژول‌های هر بازو به صورتی کنترل می‌شود که ولتاژ فاز dc مورد نیاز تولید شود. سلف مقادیر فرکانس بالا در جریان بازو را فیلتر می‌کند و جریان‌های خطا را محدود می‌سازد. مقاومت سری نیز تلفات هدایت را مدل می‌کند. شکل (۱) ساختار یک زیرماژول^۱ را نشان می‌دهد. یک مدار نیم پل که موازی با یک خازن است. ولتاژ خروجی زیرماژول برابر با ولتاژ خازن است، وقتی زیرماژول روشن است و برابر با صفر است، وقتی زیرماژول خاموش است. مدار نیم پل از دو IGBT^۲ و دو دیود تشکیل شده است. دو کلید مکمل یکدیگر کار می‌کنند. کلید اصلی S_1 و کلید کمکی S_2 است. وقتی S_1 روشن و S_2 خاموش است، زیرماژول روشن است و خازن بسته به جهت جریان شارژ یا دشارژ می‌شود. وقتی S_1 خاموش و S_2 روشن است، زیرماژول خاموش است و شارژ و دشارژی صورت نمی‌گیرد [۱۷].

با توجه به کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش نگرانی‌های زیست محیطی، برنامه‌ریزی‌ها به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر سوق پیدا کرده است. منابع تجدیدپذیر جایگزینی پاک برای سوخت‌های فسیلی هستند که می‌توان به انرژی باد، خورشیدی، زمین گرمایی، زیست توده و پیل سوختی اشاره کرد. در سال‌های اخیر انرژی خورشیدی توجه زیادی را به خودش معطوف ساخته است، به طوری که بیشترین رشد را در میان انرژی‌های تجدیدپذیر به خود اختصاص داده است [۳-۱]. یکی از کلیدی‌ترین المان‌های موجود در نیروگاه‌های فتوولتاییک اینورترها هستند که وظیفه عمده آنها تبدیل برق از dc به ac است. گروه‌های مختلفی از اینورترها شامل مبدل دوسطحی منبع ولتاژ و مبدل‌های چندسطحی به منظور استفاده در سیستم‌های فتوولتاییک معرفی شده‌اند [۹-۴]. اینورتر دوسطحی حداکثر توان را در ضریب توان یک تحویل شبکه می‌دهد ولی اغتشاش هارمونیکی بالا، استرس بالای ولتاژ بر روی سوئیچ‌های قدرت و تلفات بالای توان به دلیل فرکانس بالای کلیدزنی را دربردارد درحالی‌که اینورترهای چندسطحی THD کمتر، فرکانس کلید زنی پایین‌تر و استرس ولتاژ کمتر دارند [۳-۱۰]. در سال ۲۰۰۳ میلادی مبدل چندسطحی مازولار به عنوان جالب‌ترین توپولوژی مبدل چندسطحی معرفی شد [۱۴، ۱۵]. این مبدل‌ها در مقایسه با سایر توپولوژی‌های مبدل چندسطحی دارای خصوصیات برجسته‌ای هستند که شامل موارد زیر می‌باشد:

- (۱) حالت مازولار و مقیاس پذیری و توانایی تأمین تعداد سطوح ولتاژ متعدد.
- (۲) عملکرد هارمونیکی مناسب و در نتیجه کاهش اندازه فیلترهای پس‌یو.
- (۳) بهره بالا.
- (۴) عدم نیاز به خازن با ظرفیت زیاد در لینک DC.
- (۵) متعادل‌سازی نسبتاً آسان ولتاژ خازن و عدم نیاز به منابع DC ایزوله [۱۴-۱۸].

این مبدل به طور چشمگیری در سیستم‌های جریان مستقیم ولتاژ بالا، داربوره‌های توان بالا، ذخیره‌کننده‌های انرژی و ادوات FACTS کاربرد دارد [۱۹، ۲۰]. این مبدل در سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۲۱] اینورتر تک‌فاز سه‌سطحی مازولار جهت اتصال پانل‌های خورشیدی به شبکه پیشنهاد شده که از دوطبقه تبدیل ولتاژ بهره می‌برد که شامل یک مبدل dc/dc برای تعقیب نقطه بیشینه توان و یک مبدل چند سطحی جهت اتصال به شبکه قدرت است. در صورت عملکرد ناصحیح مبدل dc/dc کل سیستم دچار خطا می‌شود. در [۲۲] یک مبدل سه‌سطحی سه‌فاز مازولار بدون استفاده از مبدل dc/dc بررسی شده است. این ساختار دارای دو حلقه کنترلی جریان و ولتاژ است. در این مقاله عملکرد سیستم فقط در حالت ماندگار بررسی شده و شرایط بروز خطا مطالعه نشده است. در [۲۳] روش کنترلی PDPWM^۳ بهبود یافته برای مبدل چندسطحی مازولار ارائه شده که متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌ها را در کاربردهای ولتاژ بالا آسان‌تر می‌کند.

که v_{ij} و i_j به ترتیب نشان دهنده ولتاژ و جریان فاز- j ام اینورتر چندسطحی می‌باشد. ولتاژ فاز- j ام شبکه و i_{lowj} و i_{upj} جریان بازوهای مربوطه در فاز- j ام هستند. متغیرهای l و r بیان‌کننده مقدار سلف و مقاومت فیلتر RL در خروجی اینورتر می‌باشند. جریان چرخشی هر فاز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$i_{cij} = \frac{1}{2}(i_{upj} + i_{lowj}) - \frac{i_{dc}}{3} \quad (4)$$

دینامیک داخلی جریان گردش برای بازوها به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$l \frac{di_{cij}}{dt} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{v_{lowj} + v_{upj}}{2} \quad (5)$$

هم‌چنین رفتار دینامیکی هر خازن زیرماژول براساس فرمول زیر بیان می‌گردد:

$$i_{cij} = C \frac{dv_{cij}}{dt} \quad (6)$$

که در رابطه بالا اندیس i شماره زیرماژول مربوطه در فاز- j ام را نشان می‌دهد.

۳- ساختار پیشنهادی سیستم فتوولتاییک متصل

به‌شبه مبدل چندسطحی مازولار

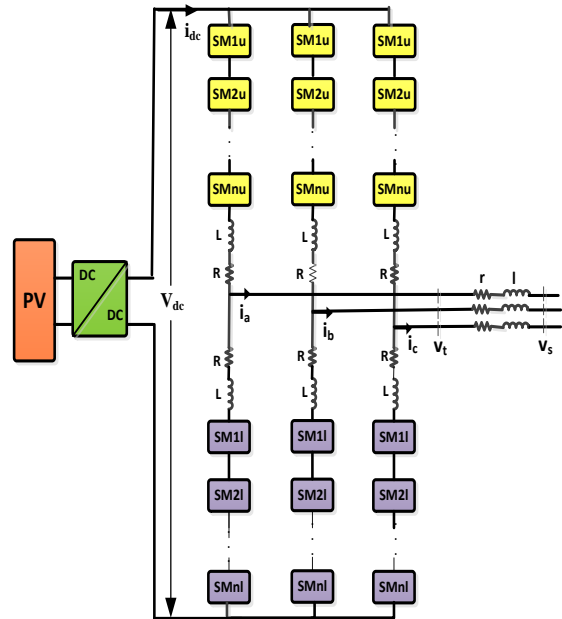
در این مقاله به‌جای استفاده از تعداد زیادی ماژول فتوولتاییک در لینک dc، بسته به میزان انرژی موردنیاز از رشته‌های کوتاه پنل فتوولتاییک و یا ماژول‌های فتوولتاییک برای تغذیه لینک dc هر زیرماژول استفاده می‌شود. شکل (۳) نشان‌دهنده مدار اصلی پیشنهادی مبدل چندسطحی است که در این ساختار لینک dc حذف شده است. شکل (۴) مدار هر زیرماژول (SM) را نشان می‌دهد که در مقایسه با شکل (۲) ماژول‌های فتوولتاییک و مبدل بوست dc/dc در هر زیرماژول به صورت دائمی قرار گرفته است. در مقایسه با مدل مرسوم مبدل چند سطحی مازولار، مدل پیشنهادی چند مزیت دارد: در ساختار قبلی، نیاز بود تا برای نخستین بار خازن‌ها تا مقدار V_{dc}/n شارژ شوند که روش‌هایی پیشنهاد شده است [۲۷، ۲۸]. توپولوژی پیشنهادی کاملاً مازولار بوده و افزایش تعداد سطوح ولتاژ آسان‌تر انجام می‌شود. ساختار ارائه شده هیچ المان متمرکزی ندارد و این امر باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. در این نمونه برخلاف مدار مرسوم نیازی به اجزای کمکی مانند کپدهای بای‌پس در مبدل‌های dc/dc نیست.

۴- استراتژی کنترل پیش‌بین در مبدل چندسطحی

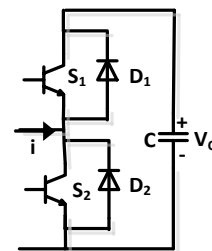
ماژولار

کنترل پیش‌بین در مبدل‌های قدرت به‌عنوان یک روش برتر معرفی شده تا جریان‌های چرخشی در بازوهای مبدل را حداقل کرده، ولتاژ خازن‌ها را متعادل نموده و جریان بار را کنترل کند.

بادر نظر گرفتن حالات کلیدزنی و با توجه به جهت جریان در هر زیرماژول، چهار حالت متفاوت ایجاد می‌گردد که در جدول ۱ به طور خلاصه نشان داده شده است.



شکل ۱: مدار اصلی مبدل



شکل ۲: مدار هر زیرماژول

جدول ۱: حالات کار زیرماژول

مد	S ₁	S ₂	حالت	خازن	جریان
۱	روشن	خاموش	on	شارژ	> 0
۲	روشن	خاموش	on	دشارژ	< 0
۳	خاموش	روشن	off	عدم تغییر	> 0
۴	خاموش	روشن	off	عدم تغییر	< 0

برای عملکرد صحیح مبدل، ولتاژ خازن هر زیرماژول نزدیک به مقدار ایده‌آل V_{dc}/n نگه‌داشته می‌شود. در هر لحظه، در هر فاز تعداد n زیرماژول از $2n$ زیرماژول روشن است تا در حالت ایده‌آل ولتاژ کل هر فاز با ولتاژ لینک dc برابر باشد [۱۷].

معادلات ریاضی نشان‌دهنده رفتار دینامیکی هر فاز این مبدل به صورت زیر است [۲۶]:

$$\frac{V_{dc}}{2} - v_{upj} = l \frac{di_{upj}}{dt} + Ri_j + L \frac{di_j}{dt} + v_{sj} \quad (1)$$

$$\frac{V_{dc}}{2} - v_{lowj} = l \frac{di_{lowj}}{dt} - Ri_j - L \frac{di_j}{dt} - v_{sj} \quad (2)$$

$$v_{tj} = Ri_j + L \frac{di_j}{dt} + v_{sj} \quad (3)$$

می‌گردد در زمان نمونه‌برداری بعدی به اینورتر اعمال می‌گردد. در خصوص یک مبدل $(n+1)$ سطحی با تعداد n زیرماژول در هر بازو تعداد حالات ممکن کلید زنی $N = C_{2n}^n$ می‌باشد. مطابق مدل ریاضی این مبدل متغیرهای مطلوب کنترل عبارتند از: جریان‌های AC خروجی، ولتاژ خازن‌ها و جریان‌های چرخشی. برای این که بتوان یک پله جلوتر (یک پریود نمونه‌برداری یا T_s) را پیش‌بینی نمود، با استفاده از تقریب اولیئر مدل زمان گسسته مبدل به دست می‌آید.

$$i_j(t+T_s) = A \left(\frac{v_{lowj}(t+T_s) - v_{upj}(t+T_s)}{2} - v_{sj}(t+T_s) + \frac{B}{T_s} i_j(t) \right) \quad (7)$$

که:

$$A = \frac{l}{2} + L, B = \frac{A}{T_s} + R \quad (8)$$

برای پیش‌بینی ولتاژ خازن‌ها در دوره بعدی باید $V_{cij}(t+T_s)$ را محاسبه نمود که:

زمانی که زیرماژول روشن است:

$$V_{cij}(t+T_s) = V_{cij}(t) + \frac{i_{mj}(t)}{C} T_s \quad (9)$$

زمانی که زیرماژول خاموش است:

$$V_{cij}(t+T_s) = V_{cij}(t) \quad (10)$$

به منظور کاهش ریپل ولتاژ خازن‌ها و تلفات مبدل لازم است جریان‌های چرخشی حداقل شوند. پیش‌بینی جریان چرخشی در دوره بعدی به صورت زیر است:

$$i_{cij}(t+T_s) = i_{cij}(t) + \frac{T_s}{2l} (V_{dc} - v_{lowj}(t+T_s) - v_{upj}(t+T_s)) \quad (11)$$

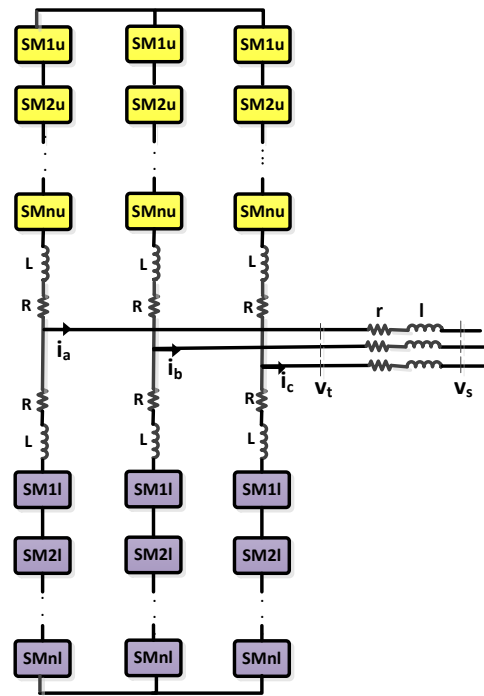
با این تعاریف می‌توان به‌طور کلی یک تابع هزینه به صورت زیر تعریف نمود:

$$g = K_x |X_{ref} - X| + K_y |Y_{ref} - Y| + \dots + K_z |Z_{ref} - Z| \quad (12)$$

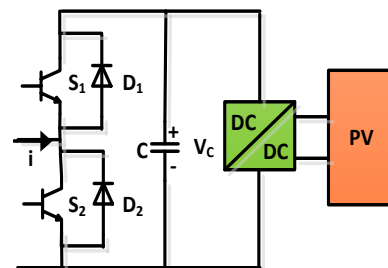
که در آن X_{ref} , Y_{ref} , Z_{ref} مقادیر مرجعی هستند که متغیرهای مطلوب کنترل دنبال می‌کنند و K_x , K_y , K_z ضرایب وزندهی بوده که با توجه به اهمیت واحدهای مختلف اجزای تابع هزینه تعیین می‌گردند. این ضرایب با روش سعی و خطا قابل محاسبه می‌باشند [۲۹، ۳۰]. در این مقاله تابع هزینه را به صورت زیر تعریف نموده که جریان‌های خروجی مرجع خود را دنبال نموده و ولتاژ تمام خازن‌ها متعادل گردد و جریان‌های چرخشی در محدوده تغییرات قابل قبول قرار گیرند.

$$g = |(i_{jref}(t+T_s) - i_j(t+T_s))| + K_1 \sum_{i=1}^{2n} |V_{ij}(t+T_s) - V_{cref}| + K_2 |i_{cir}(t+T_s)| \quad (13)$$

i_{jref} جریان مرجع بوده که با توجه به نیازهای کاربردی مشخص می‌گردد. V_{cref} ولتاژ نامی هر خازن زیرماژول است و K_1 و K_2 ضرایب

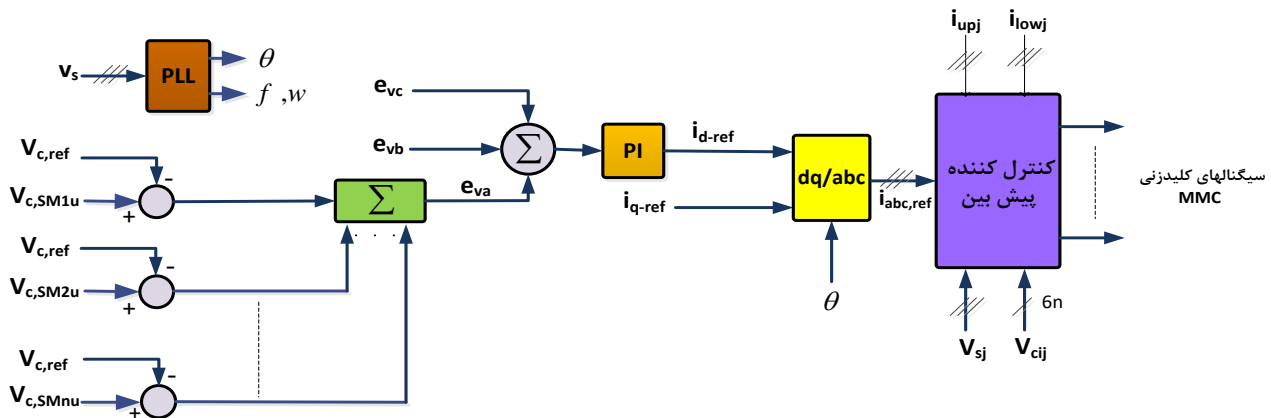


شکل ۳: مدار اصلی مبدل پیشنهادی

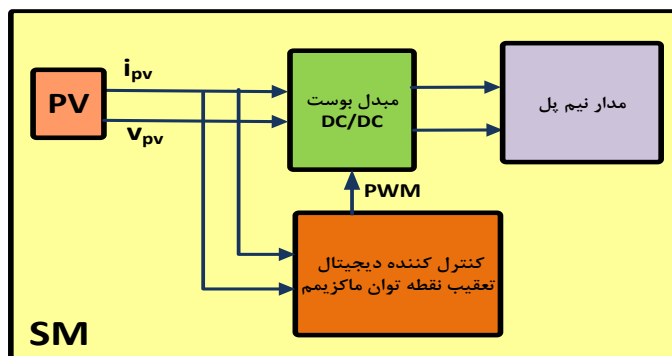


شکل ۴: مدار پیشنهادی هر زیرماژول

FCS - MPC از طبیعت گسسته مبدل‌های قدرت بهره برده تا زمان پردازش و محاسبات MPC را کاهش دهد [۲۴، ۲۹]. به دلیل این که تعداد حالات کلیدزنی مبدل محدود است، پروسه پیش‌بینی محدود به این حالات شده و بر اساس تابع هزینه یکی از این حالات به مبدل اعمال می‌شود [۲۵، ۳۰]. المان‌های اصلی این رویه کنترل، مدل ریاضی سیستم و تابع هزینه است که لازم است از پیش تعریف شده باشد. تابع هزینه اساساً یک تابع جمع بوده که شامل زیر تابع‌های مختلفی است که نشان‌دهنده نیازهای سیستم می‌باشد. تابع هزینه حداقل یک قسمت تعقیب مرجع متغیر قابل کنترل دارد که می‌تواند جریان، ولتاژ، گشتاور و یا سرعت باشد. همچنین قیود سیستم و غیر خطی‌ها هم باید به تابع هزینه اضافه شود تا در همان زمان لحاظ شود و عملکرد سیستم را بهینه سازد. این قیود می‌تواند به‌طور مثال حداقل نمودن فرکانس کلیدزنی، حداقل نمودن تلفات کلیدزنی یا شناسایی بیشینه جریان مجاز باشد. در هر ثابت زمانی تابع هزینه برای تمام حالات کلیدزنی ممکن، محاسبه می‌شود و سپس حالتی که موجب کمینه شدن تابع هزینه



(الف)



(ب)

شکل ۵: ساختار مدار کنترل MMC پیشنهادی

(الف) کنترل تعادل ولتاژ خازن‌ها (ب) کنترل MPPT در هر زیرماژول

۵- شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی تحت شرایط مختلف

برای اطمینان از عملکرد مطلوب اینورتر باید شرایط مختلفی که ممکن است برای اینورتر اتفاق بیافتد را در نظر گرفت و با استفاده از شبیه‌سازی نحوه رفتار آن بررسی شود. با توجه به اینکه اینورتر واسط بین PV و شبکه است، لازم است مجموعه به‌صورت کلی مورد بررسی شده و عملکرد آن در شرایط زیر مورد مطالعه قرار گیرد:

۱. بررسی رفتار در حالت ماندگار
۲. کاهش یا افزایش ولتاژ شبکه
۳. تغییرات فرکانس شبکه

بر اساس روش کنترل پیشنهادی، مبدل چندسطحی مازولار باید در تمامی شرایط ذکر شده بتواند پایداری خود را حفظ کند. در ادامه به‌منظور بررسی و تأیید عملکرد مدل پیشنهادی، اینورتر سه‌سطحی مازولار با روش کنترل پیش‌بین با استفاده از MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی می‌گردد. پارامترهای سیستم در جدول (۲) نشان داده شده است.

وزن‌دهی می‌باشند که با توجه به میزان اهمیت تعادل خازن‌ها و میزان جریان چرخشی قابل قبول انتخاب می‌شوند.

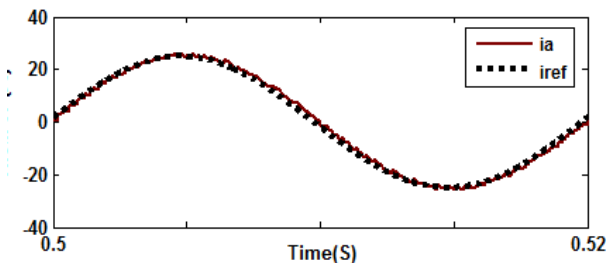
سیستم کنترل مبدل در شکل‌های (۵، الف) و (۵، ب) نشان داده شده است که شامل دو سطح کنترل است: (۱) کنترل تعادل ولتاژ خازن‌ها به منظور ایجاد جریان‌های مرجع و (۲) کنترل تعقیب نقطه بیشینه توان (MPPT)

برای تولید جریان‌های مرجع سه فاز، ولتاژ لینک dc هر زیرماژول با یک ولتاژ مرجع مقایسه شده و جمع تمام خطاها وارد یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال‌گیر (PI) می‌گردد تا دامنه مرجع جریان سه‌فاز را بسازد. جهت استفاده از این دامنه در روش کنترل پیش‌بین از تبدیل dq به abc استفاده کرده تا یک جریان مرجع سه فاز حاصل گردد. لازم به ذکر است زاویه فاز با استفاده از بلوک PLL به‌دست می‌آید.

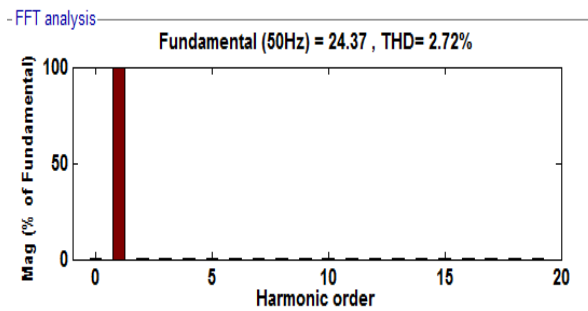
در کنترل MPPT، مبدل dc/dc در نقطه‌ای عمل کند که بیشینه توان خروجی از آرایه‌های فتوولتائیک استخراج گردد، به عبارتی سیستم فتوولتائیک در نقطه توان بیشینه عمل نماید. شکل (۶) فرآیند اجرای استراتژی MPC را به‌صورت یک فلوجارت نشان می‌دهد که در هر دوره تناوب نمونه‌برداری حالت کلیدزنی مطلوب برای هر فاز MMC به‌دست می‌آید.

۱-۵- حالت ماندگار

در این حالت فرض می‌شود که شبکه و سیستم هیچ تغییری نداشته باشند، تمام مازول‌های فتوولتاییک در شرایط یکسان محیطی (در شرایط مرجع تابش 1000 W/m^2 و دما 25°C است). قرار داشته و بیشینه توان را تولید نموده و اینورتر در حالت عادی حداکثر توان تولیدی توسط PV را به شبکه تزریق کند. برای اینکه جریان و ولتاژ در محل اتصال اینورتر به شبکه هم‌فاز باشند توان راکتیو مرجع صفر فرض می‌شود. شکل (۷) جریان خروجی فاز a و جریان مرجع را نشان می‌دهد که جریان خروجی با یک خطای ناچیز جریان مرجع را دنبال می‌کند. براساس استاندارد IEEE و IEC باید عملکرد اینورترهای متصل به شبکه به‌گونه‌ای باشد تا در شرایط مختلف بتوانند جریانی با THD کمتر از ۵ درصد به شبکه تزریق نمایند. با توجه به شکل (۸) میزان THD جریان تزریقی به شبکه توسط این اینورتر با استفاده از روش کنترل پیش‌بین ۲/۷۲ است که منطبق بر اساس استاندارد ذکر شده است.

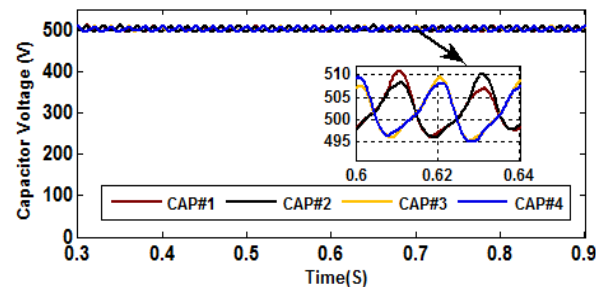


شکل ۷: جریان مرجع و جریان خروجی فاز a در یک سیکل



شکل ۸: THD جریان خروجی فاز a

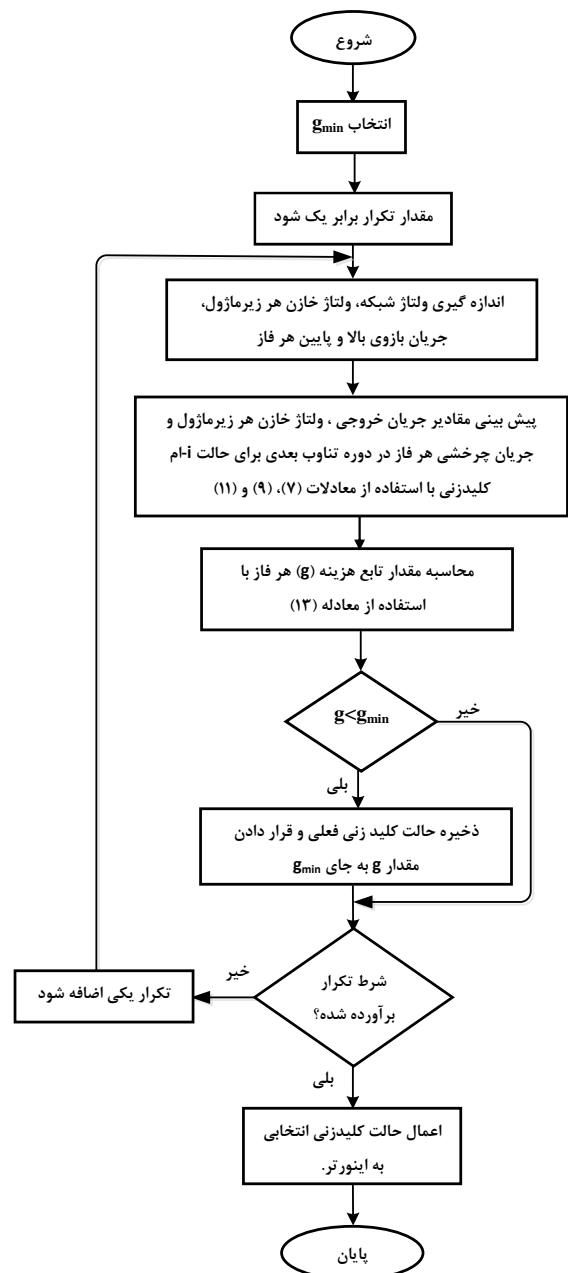
شکل (۹) ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a را نشان می‌دهد که نوسان اندکی در اطراف مقدار ولتاژ مرجع (۵۰۰ ولت) دارند.



شکل ۹: ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a

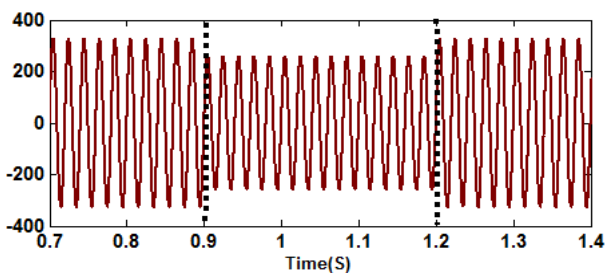
جدول ۲: پارامترهای سیستم

پارامتر	مقدار
تعداد زیرماژول در هر بازو	۲
خازن هر زیرماژول	۳ mF
سلف هر بازو	۳ mH
مقاومت هر بازو	۰/۰۴۴ ohm
سلف فیلتر	۲۰ mH
مقاومت فیلتر	۰/۰۳ ohm
سلف شبکه	۳ mH
ولتاژ نامی هر فاز شبکه	۲۲۰ V _{rms}
فرکانس کلید زنی	۱۰ KHZ

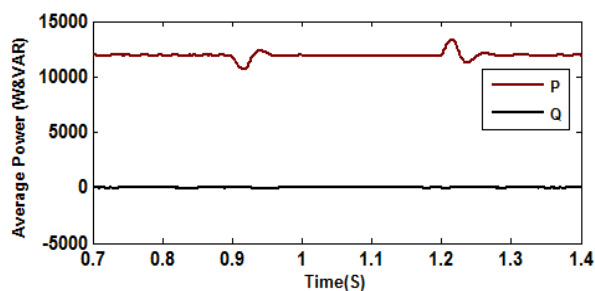


شکل ۶: فلوچارت اجرای استراتژی MPC

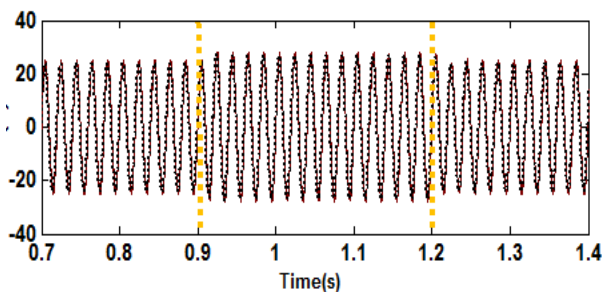
شکل (۱۴) جریان فاز a شبکه را در شرایط وقوع کاهش ولتاژ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با کاهش ولتاژ شبکه جریان تزریقی به گونه‌ای افزایش یافته که کل توان تولیدی PV به شبکه منتقل گردد.



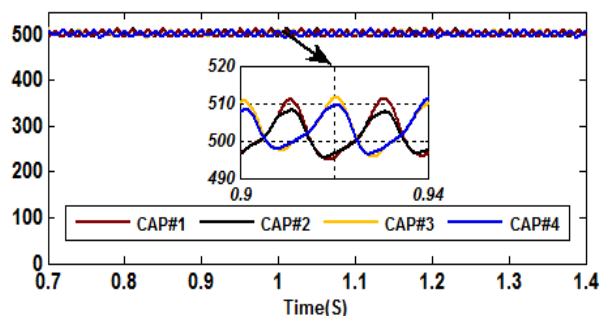
شکل ۱۲: ولتاژ فاز a شبکه در زمان کاهش ولتاژ به میزان ۰/۲ پریونیت



شکل ۱۳: متوسط توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه در زمان کاهش ولتاژ شبکه



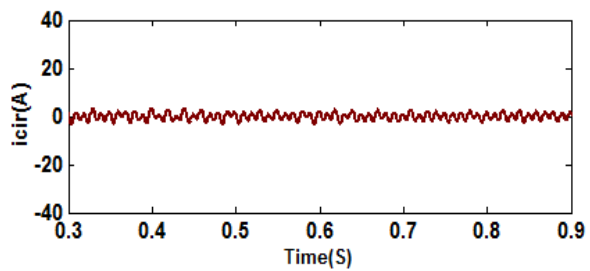
شکل ۱۴: جریان مرجع و جریان خروجی فاز a در زمان کاهش ولتاژ شبکه



شکل ۱۵: ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a در زمان کاهش ولتاژ شبکه

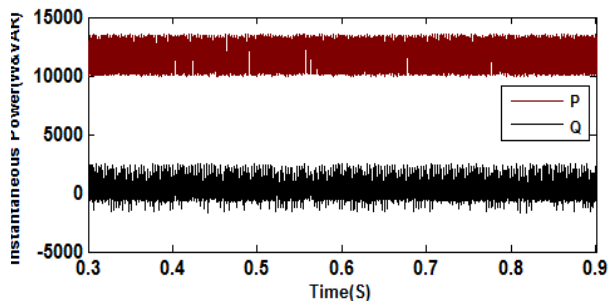
شکل (۱۵) ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a را در این شرایط نشان می‌دهد که مشاهده می‌گردد که با وجود تغییرات ولتاژ شبکه،

دامنه نوسان جریان چرخشی فاز a در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که روش کنترل پیش‌بین قابلیت محدود نمودن این جریان را در مبدل پیشنهادی داشته است.

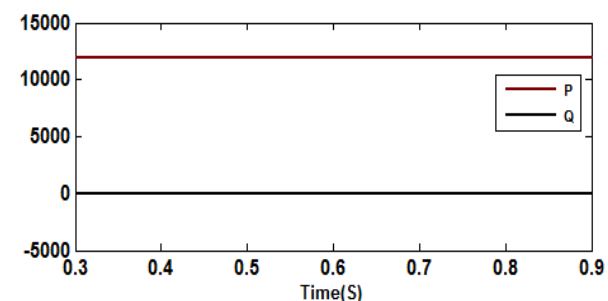


شکل ۱۰: جریان چرخشی فاز a

شکل‌های (۱۱ الف) و (۱۱ ب) به ترتیب توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای و متوسط تزریقی به شبکه را نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود تمام توان تولیدی توسط PV به شبکه تزریق می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه

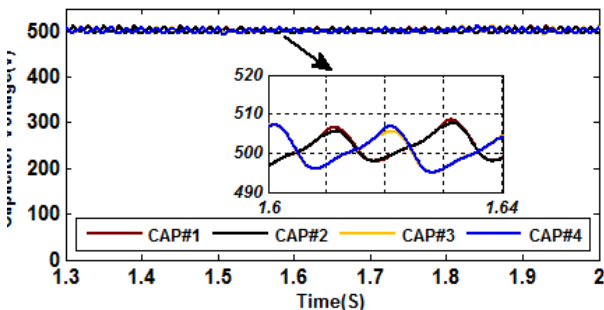
(الف) توان لحظه‌ای (ب) توان متوسط

۲-۵- تغییر ولتاژ شبکه بی‌نهایت

بر اساس شبیه‌سازی انجام شده مطابق شکل (۱۲) در لحظه ۰/۹ ثانیه افت ولتاژی به میزان ۰/۲ پریونیت به شبکه اعمال شده است که در لحظه ۱/۲ ثانیه ولتاژ شبکه به مقدار نامی خود بازمی‌گردد.

با توجه به شکل (۱۳) اینورتر به نحوی کنترل شده است تا حداکثر توان تولیدی توسط PV به شبکه منتقل شود، یعنی بلافاصله بعد از گذشت حالت گذرا در توان‌های اکتیو و راکتیو سیستم، توان منتقل شده به شبکه به مقدار نامی خود می‌رسد. این مسئله پایداری و عملکرد مطلوب روش کنترلی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

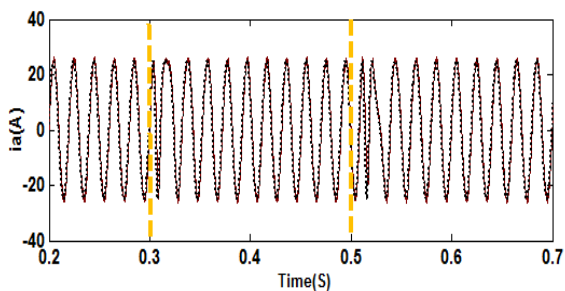
شکل (۱۹) ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پائین فاز a را در این حالت نشان می‌دهد که مشاهده می‌گردد که با وجود تغییرات ولتاژ شبکه نوسان کمی در اطراف ولتاژ مرجع وجود دارد و این حاکی از عملکرد مطلوب اینورتر دارد.



شکل ۱۹: ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پائین فاز a در زمان افزایش ولتاژ شبکه

۵-۳- تغییر فرکانس شبکه

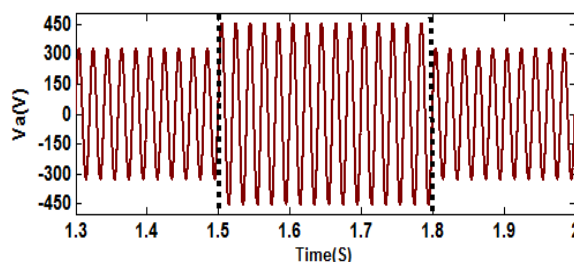
یکی از عوامل تاثیرگذار بر عملکرد اینورتر حین اتصال به شبکه، تغییر فرکانس شبکه است. بر اساس استاندارد IEC فرکانس شبکه حداکثر می‌تواند ۱٪ تا ۲٪ فرکانس اصلی سیستم تغییرات داشته باشد. تغییر فرکانس شبکه یکی از مواردی است که باید توسط PLL تشخیص داده شده و سپس اینورتر به گونه‌ای کنترل شود تا پایداری سیستم حفظ شود. در روش کنترل پیش‌بین هر تغییری در فرکانس شبکه اتفاق بیافتد، بلافاصله در فرایند کنترلی اینورتر قابل تشخیص است و در نتیجه با ایجاد شکل موج‌های مرجع دقیق، فرمان‌ها برای سوئیچ‌ها ارسال می‌شود و جریان خروجی مطلوب را به شبکه تحویل نماید. برای نشان دادن این قابلیت، شرایط افزایش فرکانس به میزان ۱ هرتز در زمان ۰/۳ ثانیه به مدت ۰/۲ ثانیه شبیه‌سازی شده است. شکل (۲۰) تغییر فرکانس جریان شبکه را نشان می‌دهد و شکل (۲۱) بیانگر آن است که در زمان افزایش فرکانس توان تزریقی به شبکه پس طی زمان گذرا تغییر نکرده است.



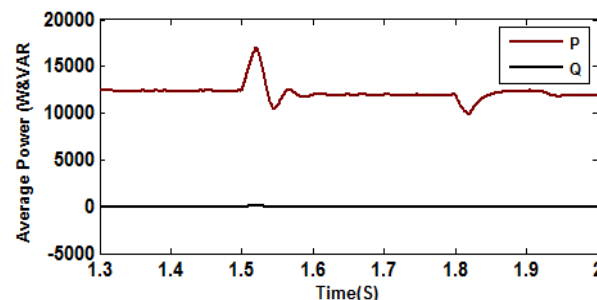
شکل ۲۰: جریان مرجع و جریان خروجی فاز a شبکه در زمان افزایش فرکانس شبکه

نوسان کمی در اطراف ولتاژ مرجع وجود دارد و این حاکی از عملکرد مطلوب اینورتر دارد.

در شرایط افزایش ولتاژ شبکه مطابق شکل (۱۶) فرض شده است که در زمان ۱/۵ ثانیه افزایش ۰/۴ پریونیت به شبکه اعمال شده و در زمان ۱/۸ ثانیه مرتفع شده است. در این شرایط انتظار می‌رود که اینورتر با کاهش جریان خروجی در زمان افزایش ولتاژ هم‌چنان حداکثر توان تولیدی را به شبکه تزریق کند و پس از رفع آن به حالت قبل از تغییر برگردد که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که بعد از گذرایی که به علت تغییر شرایط سیستم ایجاد شده، توان انتقالی به شبکه میزان اولیه باز می‌گردد و این پایداری و عملکرد مطلوب روش کنترل را تأیید می‌نماید.

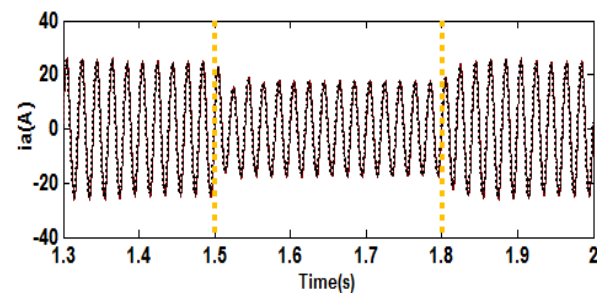


شکل ۱۶: ولتاژ فاز a شبکه در زمان افزایش ولتاژ به میزان ۰/۴ پریونیت

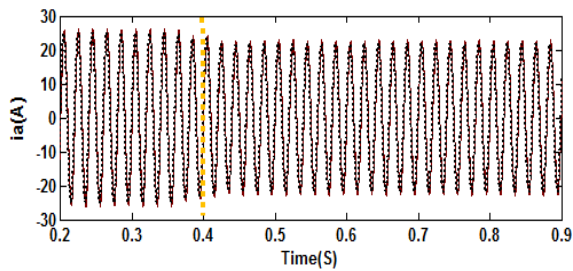


شکل ۱۷: متوسط توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه در زمان افزایش ولتاژ شبکه

شکل (۱۸) جریان فاز a شبکه را در شرایط افزایش ولتاژ نشان می‌دهد. در اینجا جریان خروجی به گونه‌ای کاهش می‌یابد که کل توان تولیدی PV به شبکه منتقل گردد.



شکل ۱۸: جریان مرجع و جریان خروجی فاز a در زمان افزایش ولتاژ شبکه



شکل ۲۴: جریان مرجع و جریان خروجی فاز a در زمان تغییر تابش

۵-۵- مقایسه با توپولوژی مرسوم

خازن‌ها یکی از المان‌های مهم در اینورترهای چندسطحی مازولار هستند. تعداد خازن‌های استفاده شده در این ساختار بستگی به زیرماترول‌های موجود دارد به گونه‌ای که یک مبدل n سطحی به 2n خازن نیاز دارد. در مدار شکل (۱) (مدار مرسوم) خازن‌ها نیاز به شارژ اولیه دارند درحالی‌که در مدار شکل (۳) (مدار پیشنهادی) نیازی به شارژ اولیه نمی‌باشد زیرا به هر زیرماترول یک پنل خورشیدی به صورت دائم متصل است. علاوه بر این اندازه ظرفیت خازن در هزینه و قابلیت اطمینان سیستم مؤثر است و ساختاری مطلوب‌تر است که از خازن‌های کوچک‌تر استفاده کند.

۵-۵-۱ نحوه محاسبه خازن در مدار پیشنهادی

برای طراحی ساختار پیوند dc در هر زیرماترول مطابق زیر عمل می‌کنیم [۳۱].

مقدار ولتاژ باس dc به وسیله یک قانون کلی برای اینورترها تعیین می‌شود. برای جریان‌های مختلف بار، ولتاژ باس dc بایستی تقریباً ۵۰٪ بزرگ‌تر از بیشینه ولتاژ خط باشد:

$$V_{DC} \cong 1.5 * \sqrt{2} * V_{line(rms)} \quad (14)$$

از طرف دیگر ولتاژ باس dc تعیین می‌شود تا بتوان خازن باس dc را محاسبه نمود. از رابطه (۱۵) به عنوان یک قانون برای تعیین خازن باس dc استفاده می‌شود:

$$C \geq \frac{3 * V_{phase(peak)} * I_{peak}}{4 * \omega * V_{DC} * \Delta V_{DC}} \quad (15)$$

با توجه به ساختار هر زیرماترول در شکل (۴) مقدار ولتاژ باس dc برای هر زیر ماترول از رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$V_c \cong \frac{3\sqrt{2}}{N} * V_{line(rms)} \quad (16)$$

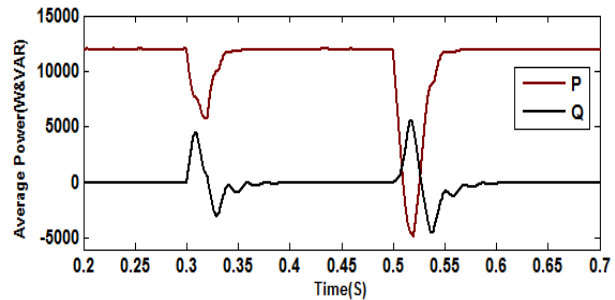
که N تعداد کل زیرماترول‌ها در هر بازوی فاز است.

هم‌چنین با استفاده از رابطه (۱۵) حداقل خازن موردنیاز برای هر زیر ماترول به صورت زیر به دست می‌آید:

$$C_{SM_new} \geq \frac{3 * V_{phase(peak)} * I_{peak} / (3 * N)}{2 * \omega * V_c * \Delta V_c} \quad (17)$$

$$= \frac{V_{phase(peak)} * I_{peak}}{4 * \omega * N * V_c * \Delta V_{cpp}}$$

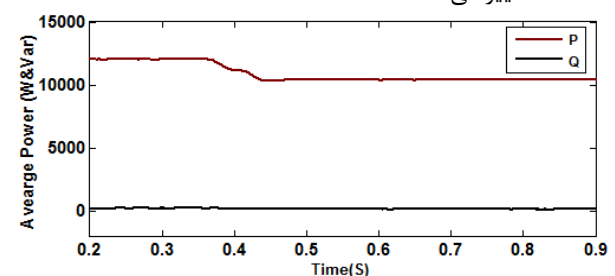
رابطه (۱۷) برحسب توان خروجی اینورتر به صورت زیر به دست می‌آید:



شکل ۲۱: متوسط توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه در زمان افزایش فرکانس شبکه

۴-۵ تغییر میزان تابش

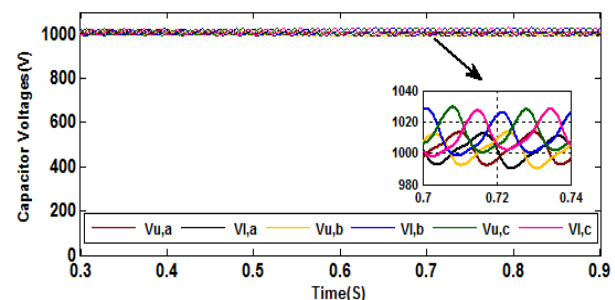
در این حالت فرض می‌شود که تا زمان ۰/۴ ثانیه شبکه و سیستم هیچ تغییراتی نداشته باشند، تمام ماترول‌های فتوولتاییک در شرایط یکسان محیطی (در شرایط مرجع تابش ۱۰۰۰ W/m² و دما ۲۵°C است). قرار داشته و بیشینه توان را تولید نموده و اینورتر در حالت عادی حداکثر توان تولیدی توسط PV را به شبکه تزریق کند. بر اساس شبیه‌سازی انجام شده در لحظه ۰/۴ ثانیه تغییر تابش برای اولین زیرماترول هر فاز رخ می‌دهد یعنی تابش از ۱۰۰۰ W/m² به ۷۰۰ W/m² می‌رسد. با این تغییر شکل (۲۲) نشان می‌دهد که توان خروجی کل از ۱۲ KW به ۱۱/۱ KW تغییر می‌کند.



شکل ۲۲: توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه در زمان تغییر تابش

شکل (۲۳) مجموع ولتاژ بازوهای بالا و پایین در هر فاز را نشان

می‌دهد که تعادل ولتاژ خازن‌ها به خوبی انجام شده است.

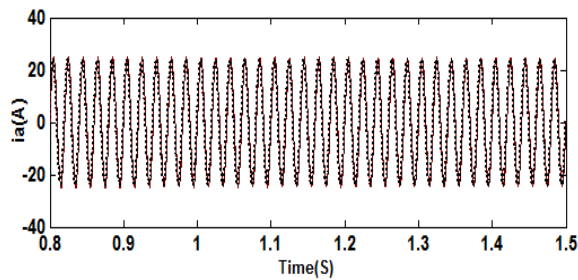


شکل ۲۳: مجموع ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a

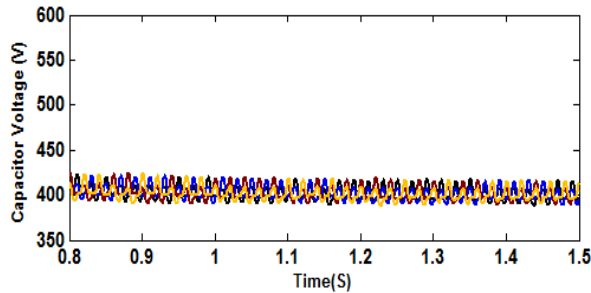
در زمان تغییر تابش

شکل (۲۴) جریان فاز a را در زمان تغییر تابش نشان می‌دهند که

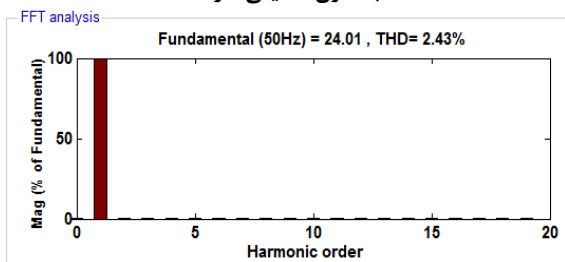
مشاهده می‌شود به دلیل کاهش توان خروجی جریان فاز نیز کاهش یافته است.



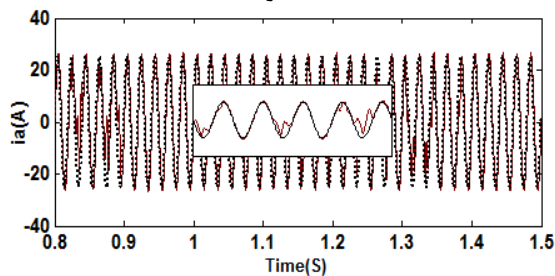
شکل ۲۵: جریان مرجع و جریان خروجی فاز a در مدار مرسوم با خازن ۲ میلی فاراد



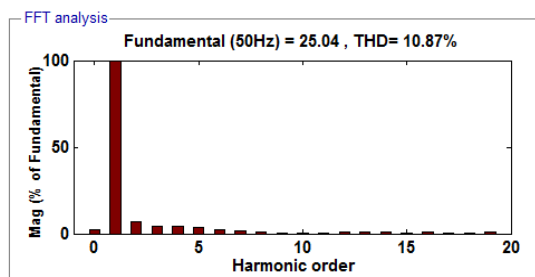
شکل ۲۶: ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a در مدار مرسوم با خازن ۲ میلی فاراد



شکل ۲۷: THD جریان خروجی فاز a در مدار مرسوم با خازن ۲ میلی فاراد



شکل ۲۸: جریان مرجع و جریان خروجی فاز a در مدار مرسوم با خازن ۱/۸ میلی فاراد



شکل ۲۹: THD جریان خروجی فاز a در مدار مرسوم با خازن ۱/۸ میلی فاراد

$$C_{SM_new} \geq \frac{\frac{2}{3} * P}{4 * \omega * N * V_c * \Delta V_{cpp}} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، P توان سه‌فاز خروجی اینورتر، V_c ولتاژ خازن، ΔV_c بیشینه دامنه ریبیل قابل مجاز خازن، ΔV_{cpp} مقدار پیک تا پیک ریبیل بیشینه و ω فرکانس زاویه‌ای جریان خروجی اینورتر است.

۵-۵-۲ نحوه محاسبه خازن در مدار مرسوم

در مطالعات مربوط به معرفی ساختار MMC مرسوم جهت انتخاب اندازه خازن از رابطه (۱۹) استفاده شده است [۱۵، ۱۸].

$$C_{SM_old} = \frac{m * P}{4 * N * \omega * V_c * \Delta V_c} * \left(1 - \frac{1}{m^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (19)$$

در این رابطه N تعداد کل زیرماژول‌ها در هر بازو و m نسبت جریان است که برای هر مقدار جریان خروجی و هر ضریب توان باید $2m \geq$ انتخاب شود [۱۵]. رابطه بیان شده نشان می‌دهد که مقدار خازن رابطه مستقیم با توان اکتیو انتقالی و رابطه معکوس با ولتاژ نامی خازن و فرکانس جریان مدار دارد.

برای مقایسه مقدار خازن در دو مدار مرسوم و پیشنهادی رابطه (۱۸) را بر رابطه (۱۹) تقسیم نموده که رابطه (۲۰) به دست می‌آید.

$$\frac{C_{SM_new}}{C_{SM_old}} = \frac{1}{1.5m * \left(1 - \frac{1}{m^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (20)$$

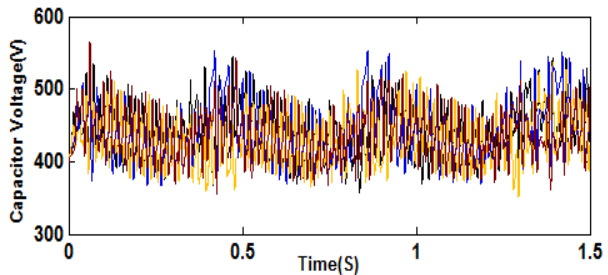
برای m برابر ۲ مقدار نسبت خازن‌ها از رابطه (۲۰) برابر ۰/۵۲ می‌شود. برای m‌های بزرگ‌تر از ۲ نسبت خازن‌ها با هم کوچک‌تر می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی این قابلیت را دارد که بتوان حداقل ظرفیت خازن‌ها را تا ۴۸٪ نسبت به توپولوژی مرسوم کاهش داد.

برای تأیید این موضوع در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی به بررسی ظرفیت خازن در هر دو مدار مرسوم و پیشنهادی می‌پردازیم. شکل‌های (۲۵) و (۲۶) به ترتیب جریان مرجع و جریان خروجی فاز a و ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a را در ساختار مرسوم نشان می‌دهد وقتی ظرفیت خازن هر زیرماژول ۲mF است. در این حالت THD جریان ۲/۴۳٪ می‌باشد که در شکل (۲۷) نشان داده شده است. با کاهش ظرفیت خازن و انتخاب ظرفیت ۱/۸mF، در شکل (۲۸) مشاهده می‌شود که جریان خروجی به درستی جریان مرجع را تعقیب نمی‌کند و THD جریان در شکل (۲۹) برابر با ۱۰/۸۷٪ است که بر طبق استانداردهای IEC و IEEE قابل قبول نمی‌باشد. شکل (۳۰) ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a را نشان می‌دهد که دامنه عدم تعادل ولتاژ بالا است و سیستم با گذشت زمان به حالت پایدار نمی‌رسد. شکل‌های (۳۱) و (۳۲) به ترتیب جریان مرجع و جریان خروجی فاز a و ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a را در ساختار پیشنهادی نشان می‌دهد. در این حالت THD جریان ۲/۶۴٪ می‌باشد که در شکل (۳۳) نشان داده شده است.

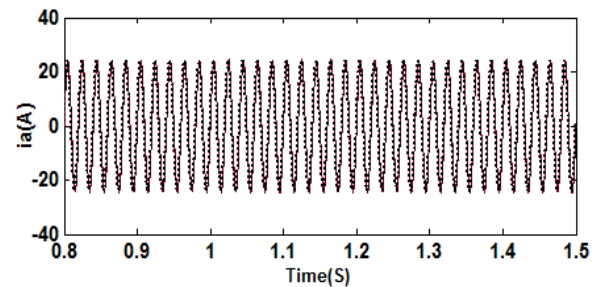
کنترل پیش‌بین که امروزه به‌عنوان یک روش برتر در مبدل‌های قدرت معرفی شده است. عملکرد این مبدل در شرایط ماندگار، کاهش و افزایش ولتاژ شبکه، تغییرات فرکانس شبکه و تغییر میزان تابش بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر عملکرد مناسب ساختار پیشنهادی بر اساس استانداردهای IEEE و IEC است. ساختار پیشنهادی می‌تواند تا ۴۸٪ کاهش در اندازه ظرفیت هر خازن نسبت به ساختار مرسوم، هزینه کمتری داشته و از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار باشد.

مراجع

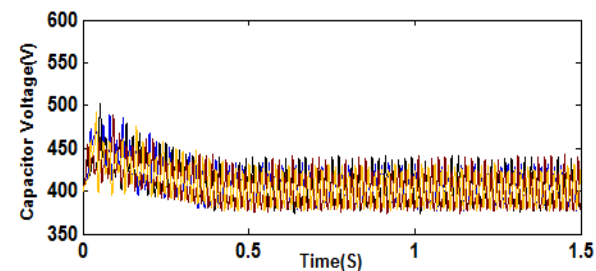
- [1] J. M. Carrasco et al., "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [2] A. Keyhani, M. Marwali, *Smart power grids*, Springer, 2011.
- [3] سعید عباسی، علی اصغر قدیمی و امیر حسین ابوالمعمومی، «حذف نوسانات توان اکتیو تزریقی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در شرایط افت ولتاژ»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحات ۱۴۹–۱۵۸، ۱۳۹۵.
- [4] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, John Wiley & Sons, New York, USA, 2011.
- [5] R. Maheshwari, S. Munk-Nielsen, and S. Busquets-Monge, "Design of neutral-point voltage controller of a three-level NPC inverter with small DC-link capacitors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 5, pp. 1861–1871, 2013.
- [6] P. Kakosimos, K. Pavlou, A. Kladas, S. Manias, "A single-phase nine-level inverter for renewable energy systems employing model predictive control," *Energy Conversion and Management*, vol. 89, pp. 427–437, 2015.
- [7] H. R. Teymour, D. Sutanto, K. M. Muttaqi, and P. Ciufo, "Solar PV and Battery Storage Integration using a New Configuration of a Three-Level NPC Inverter With Advanced Control Strategy," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, pp. 354–365, 2014.
- [8] K. Himour, K. Ghedamsi, E. M. Berkouk, "Supervision and control of grid connected PV-Storage systems with the five level diode clamped inverter," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 98–107, 2014.
- [9] سعید سعیدآبادی، امین اشرف گندمی، سید حسین حسینی و مهران صباحی، «اینورتر جدید چند سطحی سه فاز هیبریدی بهبود یافته»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحات ۵۵۱–۵۶۲، ۱۳۹۶.
- [10] سیما شاه محمدی، سیدحسین حسینی، ابراهیم بابایی، مهران صباحی و جابر فلاح، «آنالیز تحلیلی هارمونیک‌های خروجی اینورترهای چند سطحی در حالت کلیدزنی نامتقارن»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۲۰۹–۲۱۹، ۱۳۹۵.
- [11] V. S. Prasadaro K, P. Sudha Rani, G. Tabita, "A New Multilevel Inverter Topology for Grid Interconnection of PV Systems," *Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, 2014.
- [12] R. Karasani, V. B. Borghate, P. M. Meshram, H. M. Suryawanshi, S. Sabyasachi, "A Three Phase Hybrid cascaded Modular Multilevel Inverter for Renewable Energy Environment," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. PP, no. 99, pp. 1–20, 2016.
- [13] Md. R. Islam, Y. Guo, J. Zhu, "A Multilevel Medium-Voltage Inverter for Step-Up-Transformer-Less Grid Connection of Photovoltaic Power Plants," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 3, pp. 881–889, 2014.
- [14] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," *Proceedings*



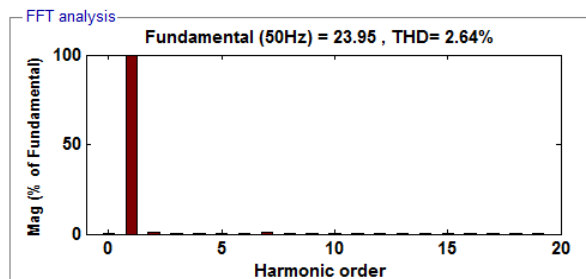
شکل ۳۰: ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a در مدار مرسوم با خازن ۱/۸ میلی فاراد



شکل ۳۱: جریان مرجع و جریان خروجی فاز a در مدار پیشنهادی با خازن ۱/۳۵ میلی فاراد



شکل ۳۲: ولتاژ خازن‌های بازوی بالا و پایین فاز a در مدار پیشنهادی با خازن ۱/۳۵ میلی فاراد



شکل ۳۳: THD جریان خروجی فاز a در مدار پیشنهادی با خازن ۱/۳۵ میلی فاراد

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به ویژگی‌های مناسب مبدل چندسطحی مازولار استفاده از این مبدل در بسیاری از کاربردها از جمله سیستم فتوولتائیک پیشنهاد شده است. در این مقاله ساختار جدیدی از MMC برای سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه ارائه شد. در اینجا بسته به میزان انرژی موردنیاز از رشته‌های کوتاه پنل فتوولتائیک و یا مازول‌های فتوولتائیک برای تغذیه لینک dc هر زیرماژول استفاده شده است. با استفاده از روش

- [23] J. Mei, B. Xiao, K. Shen, L. M. Tolbert and J. Y. Zheng, "Modular Multilevel Inverter with New Modulation Method and Its Application to Photovoltaic Grid-Connected Generator," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 28, no. 11, pp 5063-5073, 2013.
- [24] A. Calle-Prado, S. Alepuz, J. Bordonau, P. Cortes, and J. Rodriguez, "Predictive Control of a Back-to-Back NPC Converter-Based Wind Power System," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, pp. 4615-4627, 2016.
- [25] S. Kouro, P. Cortes, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodriguez, "Model predictive control - a simple and powerful method to control power converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 6, pp. 1826-1838, 2009.
- [26] J. Qin and M. Saeedifard, "Predictive control of a modular multilevel converter for a back-to-back HVDC system," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 3, pp. 1538-1547, 2012.
- [27] B. Chuco, E. H. Watanabe, "Back-to-Back HVDC Based on Modular Multilevel Converter" Brazilain Power Electronics Conference (COBEP), Brazil, 2011.
- [28] A. Das, H. Nademi, L. Norum, "A Method for Charging and Discharging Capacitors in Modular Multilevel Converter," Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Australia, 2011.
- [29] J. Rodriguez and P. Cortes, *Predictive control of power converters and electrical drives*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2012.
- [30] K. Barra, D. Rahem, "Predictive direct power control for photovoltaic grid connected system: An approach based on multilevel converters," Energy Conversion and Management, Vol. 78, pp. 825-834, 2014.
- [31] M.G. Villalva, F.P. Marafao, M.M. Kubo, and E.R. Filho, "Practical rules for designing a shunt active power filter for nonlinear unbalanced loads", 16th Brazilian Conference on Automatic Control, Brazil, 2006.
- [15] A. Lesnicar and R. Marquardt, "A new modular voltage source inverter topology," European Power Electronics Conference, pp. 1-10, France, 2003.
- [16] M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 7, pp. 1737-1746, 2009.
- [17] M. Saeedifard, R. Irvani, "Dynamic Performance of a Modular Multilevel Back-to-Back HVDC System," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2903-2912, 2010.
- [18] S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 1, pp. 37-53, 2015.
- [19] L. Maharjan, T. Yamagishi, H. Akagi, and J. Asakura, "Fault-tolerant operation of a battery-energy-storage system based on a multilevel cascade PWM converter with star configuration," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 9, pp. 2386-2396, 2010.
- [20] M. Hagiwara, R. Maeda, and H. Akagi, "Negative-sequence reactive power control by the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC)," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 3949-3954, 2010.
- [21] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, G. P. Adam, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Modular multilevel inverter with maximum power point tracking for grid connected photovoltaic application," IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 2057-2062, 2011.
- [22] S. Jasekar and R. Gupta, "Solar photovoltaic power conversion using modular multilevel converter," Students Conference on Engineering and Systems, pp. 1-6, 2012.

زیر نویس ها

⁵ Finite control Set

⁶ Maximum Power Point Tracking

⁷ Phase Locked Loop

¹ Flexible AC Transmission Systems

² Phase disposition Pulse Width Modulation

³ Submodule

⁴ Insulated Gate Bipolar Transistor