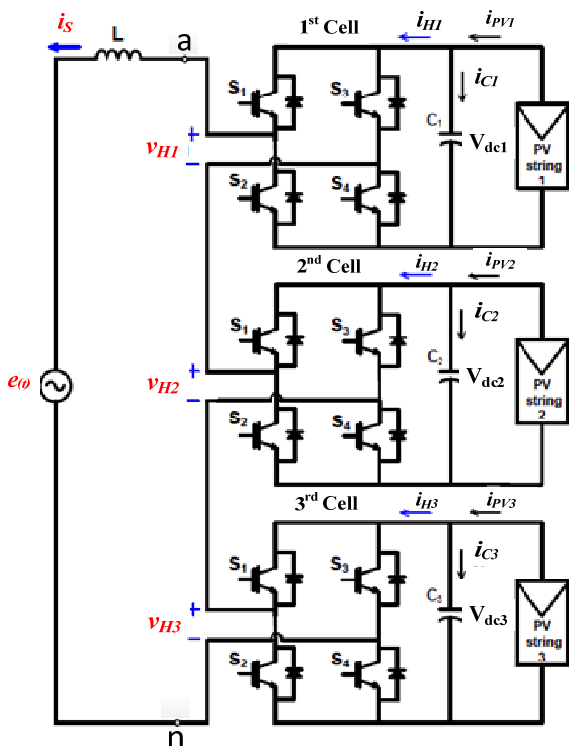


بهبود عملکرد اینورترهای فتوولتائیک پل متوالی متصل به شبکه در شرایط تابشی نامتقارن

حسین ایمان عینی، مهراز امینی و شاهرخ فرهنگی



شکل ۱: سامانه خورشیدی متصل به شبکه توسط اینورتر پل متوالی ۷ سطحی.

سامانه‌های خورشیدی معرفی شده‌اند [۲] و [۳]. این نوع اینورترها امکان تزریق جریان سینوسی با اعوجاج هارمونیکی کم را به شبکه فراهم می‌نمایند و همچنین به علت قابلیت پردازش توان در یک مرحله، بازده بالایی دارند. ضمناً آرایش‌های چندسطحی با فراهم آوردن چندین لینک dc مجزا تأثیر عدم تطابق مازول‌ها در آرایه‌های خورشیدی را کم می‌کنند [۴] و [۵].

در میان آرایش‌های مختلف چندسطحی، مبدل پل متوالی به علت داشتن باس‌های dc مجزا مناسب‌ترین گزینه برای کاربرد فتوولتائیک است (شکل ۱). ساختار ساده و مدول‌وار، عدم نیاز به دیود و خازن مهار و قابلیت اطمینان بیشتر از دیگر مزایای این آرایش است. کنترل اینورتر پل متوالی در حالت متقارن نسبتاً ساده است اما با توجه به امکان شرایط تابشی نامتقارن برای آرایه‌ها و امکان به وجود آمدن شرایط سایه جزئی، کار مدار کنترل دشوار و پیچیده خواهد شد [۶]. زیرا در سیستم کنترل اینورترهای پل متوالی بایستی از طریق کلیدزنی n سلول تمام پل، ولتاژ n آرایه خورشیدی مجزا را در نقطه بیشینه توان تنظیم نمود و در عین حال جریان تزریقی به شبکه را کنترل نمود. به عبارتی باید توسط n ضریب کنترلی، $n+1$ متغیر را کنترل نمود که این امر باعث ناپایداری ذاتی سیستم می‌شود [۷]. این محدودیت در کنترل سامانه‌های خورشیدی باعث از دست رفتن پایداری در شرایط نامتقارن و لزوم جداکردن سامانه خورشیدی از شبکه می‌شود.

چکیده: در سال‌های اخیر انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. مهم‌ترین بحث در زمینه انرژی خورشیدی، قیمت پایین، بازده بالا و کیفیت مناسب توان تزریقی به شبکه است. علی‌رغم این که اینورتر چندسطحی پل متوالی گزینه مناسبی برای کاربردهای فتوولتائیک متصل به شبکه است (به دلیل دارا بودن باس‌های dc مجزا) اما مسایل کنترلی آن به طور کامل حل نشده و یکی از مهم‌ترین چالش‌ها مربوط به حاشیه پایداری کم اینورتر پل متوالی در شرایط تابشی نامتقارن است. در این مقاله یک روش جستجوی نقطه توان بیشینه اصلاح‌شده در مبدل ۷ سطحی پل متوالی متصل به شبکه بررسی می‌شود. در روش پیشنهادی، ضمن ردیابی نقطه توان بیشینه آرایه‌های خورشیدی در حالت متقارن، با جابه‌جایی نقطه کار مازول‌ها در حالت نامتقارن و استفاده از ضریب مدولاسیون پل‌ها به عنوان یک درجه آزادی، تزریق توان صحیح و پایدار ادامه می‌یابد. در انتها صحت و درستی عملکرد روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی‌های متعدد و همین‌طور نتایج آزمایشگاهی تأیید می‌شود.

کلید واژه: اینورترهای چندسطحی پل متوالی، اینورتر فتوولتائیک متصل به شبکه، ردیابی نقطه توان بیشینه، سیستم‌های فتوولتائیک.

۱- مقدمه

محدودبودن منابع فسیلی از یک سو و ملاحظات آلودگی‌های زیست‌محیطی از سوی دیگر نیاز به جایگزینی منابع فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک را بیش از پیش نمایان می‌سازد. از میان انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک، انرژی خورشیدی به خاطر خصوصیات منحصر به فرد خصوصاً در دسترس بودن آن مورد توجه قرار گرفته است. قیمت بالای صفحات خورشیدی باعث شده تا تمرکز زیادی روی اینورترهای با بازده بالا صورت گیرد. متداول‌ترین آرایش اینورتری که کار برده شده در سامانه‌های خورشیدی، ساختار دوسطحی چندرشته‌ای بوده [۱] که در این آرایش هر رشته از آرایه‌های خورشیدی به وسیله یک مبدل dc-dc به باس dc مشترک وصل می‌شود. انرژی ذخیره‌شده در لینک dc از طریق یک اینورتر پرتوان به شبکه تزریق می‌شود. از مزایای این روش مدولاربودن سامانه خورشیدی و امکان ردیابی نقطه توان بیشینه هر رشته از آرایه‌های خورشیدی به صورت جداگانه است.

اخیراً اینورترهای چندسطحی به دلیل مزایایی که دارند برای کاربرد در

این مقاله در تاریخ ۲۹ اردیبهشت ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۱۴ آبان ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

حسین ایمان عینی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: imaneini@ut.ac.ir).

مهراز امینی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: amini.mahraz@gmail.com).

شاهرخ فرهنگی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، (email: farhangi@ut.ac.ir).

که در آن v_{Hj}^1 هارمونیک اول ولتاژ سمت ac در j امین سلول، V_{dcj} ولتاژ dc سلول j ام و s_j موج مدوله کننده پل j ام است. موج مدوله کننده طبق (۱) دارای شکل موج سینوسی و دامنه آن در محدوده مدولاسیون خطی در $[-1, 1]$ است. با در نظر گرفتن (۱) و اعمال محدودیت kVI به حلقه ولتاژ شکل ۱ خواهیم داشت

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L} (e - Ri_s - \sum_{j=1}^r s_j V_{dcj}) \quad (2)$$

که i_s نشان دهنده جریان تزریقی به شبکه، $e(t)$ نماد ولتاژ شبکه، R و L نشان دهنده مقاومت و اندوکتانس فیلتر سلفی و C_j نشان دهنده خازن لینک dc سلول j ام است. معادله (۲) دینامیک جریان تزریقی به شبکه را نشان می دهد.

۳- تحلیل پایداری و سیستم کنترلی در روش پیشنهادی

با وجود این که می توان اندیس مدولاسیون یک سلول تمام پل را تا مقدار $4/\pi$ افزایش داد، اما به دلیل ورود به ناحیه فرامدولاسیون و افزایش اعوجاج هارمونیک جریان تزریقی به شبکه و همین طور افزایش تلفات، حد بالای اندیس مدولاسیون برابر با یک در نظر گرفته می شود

$$|s_j| \leq 1 \quad (3)$$

همچنین با توجه به این که در هر سلول محدودیت kcl در سمت لینک DC الزام می کند که $i_{Hj} = i_{PVj} - i_{Cj}$ باشد، سپس با متوسط گیری از آن خواهیم داشت

$$\bar{i}_{Hj} = \bar{i}_{PVj} - \bar{i}_{Cj} \rightarrow I_{Hj} = I_{PVj} \quad (4)$$

در اثبات رابطه اخیر از این نکته استفاده شده که متوسط جریان عبوری از خازن در حالت دایمی صفر است. ضمناً لازم به توضیح است که در این مقاله مقادیر متوسط و یا dc با حروف بزرگ و مقادیر متغیر با زمان با حروف کوچک نشان داده می شوند تا از هم تفکیک شوند.

حال اگر اتلاف هر پل صفر فرض شود، در آن صورت متوسط توان ورودی و خروجی هر پل در حالت دایمی برابر خواهد بود و می توان نوشت

$$P_{in, cell} = P_{out, cell} \rightarrow V_{dcj} I_{Hj} = \frac{1}{\sqrt{3}} |v_{Hj}^1| |i_s| \cos \delta \quad (5)$$

که $|i_s|$ دامنه جریان تزریقی به شبکه و δ اختلاف فاز میان جریان تزریقی به شبکه و هارمونیک اول ولتاژ تولیدشده توسط سلول j ام است که مقدار بسیار کمی دارد. با فرض $\cos \delta \approx 1$ و استفاده از (۴)، (۵) و (۱) خواهیم داشت

$$I_{PVj} = I_{Hj} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{|v_{Hj}^1|}{V_{dcj}} |i_s| = \frac{1}{\sqrt{3}} |s_j| |i_s| \quad (6)$$

از بازنویسی (۶) به دست می آوریم

$$|s_j| = \frac{\sqrt{3} I_{PVj}}{|i_s|} \leq 1, \quad j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

همچنین در حالت کار دایمی مبدل، بایستی متوسط توان تولیدی توسط آرایه ها با متوسط توان تزریقی به شبکه برابر باشد (با فرض ناچیز بودن تلفات مبدل و مقاومت سری فیلتر) و می توان نوشت

$$P = \sum_{j=1}^r I_{PVj} V_{PVj} = \frac{1}{\sqrt{3}} |e| \cdot |i_s| \quad (8)$$

در سال های اخیر شیوه های کنترلی متعددی برای اینورترهای فتوولتائیک پل متوالی متصل به شبکه برای کنترل جریان و ردیابی نقطه توان بیشینه آرایه ها ارائه شده است [۸] تا [۱۲]. در [۸] یک کنترل کننده بر مبنای منطق فازی معرفی شده که بدون استفاده از کنترل کننده داخلی قادر به کنترل پل های مجزای اینورتر است. علی رغم سادگی اما قادر به از بین بردن هارمونیک های جریان نیست و در آن ملاحظات پایداری اینورتر بررسی نشده است. در [۹] از استراتژی های کنترل کلاسیک در اینورترهای پل متوالی استفاده شده که این شیوه کنترلی در حالت متقارن بسیار کارآمد عمل می کند اما با توجه به این که ممکن است شرایط نامتقارن برای اینورتر پیش بیاید، این روش دچار ناپایداری شده و قادر به ادامه تزریق توان به شبکه نخواهد بود. در [۱۰] از ضریب توان ورودی مبدل به عنوان یک درجه آزادی برای بهبود پایداری مبدل پل متوالی استفاده شده است. علی رغم عملکرد خوب در حالت متقارن و نامتقارن، شیوه ارائه شده بر مبنای محاسبات سنگین بنا شده و پیاده سازی آن بسیار دشوار است. در [۱۱] مبدل پل متوالی هایبرید با سیستم کنترلی ساده ارائه شده و در [۱۲] آرایش های گوناگون مبدل های چندسطحی متصل به شبکه در کاربرد فتوولتائیک معرفی شده است. با این وجود در مراجع اشاره شده بحث حاشیه پایداری و امکان کار در شرایط نامتقارن به صورت دقیق بررسی نشده است.

در این مقاله بر مبنای تحلیل های ریاضی و مداری، یک روش جدید برای تنظیم ولتاژ سلول ها و تزریق جریان سینوسی با کیفیت مناسب به شبکه حتی در شرایط نامتقارن آرایه های خورشیدی ارائه می شود. در روش پیشنهادی از ضریب مدولاسیون پل ها (یا همان سلول های تمام پل) به عنوان ابزاری برای حفظ شرایط پایداری استفاده می شود. در نهایت صحت روش پیشنهادی از طریق نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی تأیید خواهد شد.

۲- ساختار اینورتر پل متوالی

در شکل ۱ ساختار اینورتر تک فاز فتوولتائیک پل متوالی نشان داده شده که توسط یک فیلتر سلفی به شبکه متصل شده است. این مبدل کاملاً مدولوار بوده و از اتصال سری n پل مشابه (در این مقاله $n = 3$ می باشد) ساخته شده است. هر سلول دارای چهار کلید قدرت و یک خازن لینک dc است که یک رشته از آرایه های خورشیدی به آن متصل می شود. ضمناً هر سلول تمام پل دارای دو پایانه ac است که در آن ولتاژ ac سلول (یعنی v_{Hj}) ساخته می شود و مجموع ولتاژ ترمینال های ac قادر به تولید سه سطح ولتاژ در ترمینال ac است، بنابراین با استفاده از n پل سری می توان $2n + 1$ سطح ولتاژ در ترمینال فاز مبدل تولید نمود.

در [۱۳] روش های گوناگون مدولاسیون برای اینورتر پل متوالی معرفی شده است. در میان این روش ها، روش PWM شیفت فاز به سادگی قابل پیاده سازی است و از همه کلیدها در مبدل به صورت مساوی استفاده می کند. به همین دلیل در این مقاله از روش PWM شیفت فاز به عنوان روش کلیدزنی پایه استفاده می شود.

با توجه به شکل ۱ و در نظر گرفتن شرایط کار دائمی می توان موج مدوله کننده j امین پل (یا سلول تمام پل) را به شکل زیر تعریف کرد

$$s_j = \frac{v_{Hj}^1}{V_{dcj}} \quad (1)$$

ولتاژ مرجع پل‌ها (در شکل ۲-الف) شامل سه واحد مشابه ردیاب نقطه توان بیشینه است. این بخش در ابتدا شرط پایداری را طبق (۹) برای هر سه پل چک می‌نماید. در صورتی که دامنه اندیس مدولاسیون هر پل کمتر از یک باشد، ردیاب بیشینه توان عملکرد عادی داشته و ولتاژ متناظر با نقطه توان بیشینه برای هر سه پل یعنی V_{dcj}^* ($j=1,2,3$) تولید می‌شود. در صورتی که دامنه اندیس مدولاسیون برخی از پل‌ها بیشتر از یک باشد، ولتاژ کاری پل‌های مربوط افزایش داده می‌شود تا شرط پایداری (۹) برای هر سه پل برقرار شود. وضعیت اخیر می‌تواند در مواقعی رخ دهد که توان تولیدی برخی از آرایه‌ها (یا پل‌ها) کاهش یابد و در نتیجه ضریب مدولاسیون سلول‌های پرتوان به مقداری بیشتر از ۱ افزایش یابد و موجب ناپایداری سامانه شود.

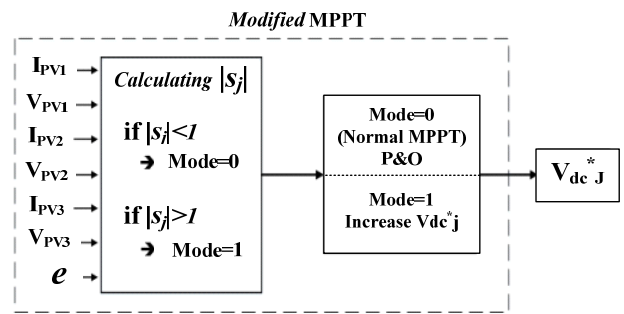
عملکرد بخش دوم یعنی کنترل‌کننده جریان تزریقی به شبکه (شکل ۲-ب) به این صورت است که مجموع ولتاژ کل لینک‌های dc با مجموع ولتاژ کل مراجع dc مقایسه شده و خطای ولتاژ وارد کنترل‌کننده PI می‌شود. خروجی کنترل‌کننده، دامنه جریان تزریقی به شبکه را تعیین می‌کند و سپس دامنه جریان در فاز ولتاژ شبکه $\sin \theta$ که به وسیله PLL آشکار گردیده، ضرب شده و مرجع جریان سینوسی i_s^* را می‌سازد. پس از آن جریان خروجی با مرجع جریان مقایسه شده و خطای جریان وارد کنترل‌کننده جریان می‌شود. در این مقاله به دلیل متناوب بودن مؤلفه‌های جریانی، از کنترل‌کننده تناسبی-رزونانسی برای کنترل دامنه هارمونیک اصلی جریان و همین‌طور حذف مؤلفه‌های هارمونیک سه و پنج استفاده شده که توضیحات تکمیلی در مورد این نوع کنترل‌کننده در [۱۴] آمده است. در نهایت خروجی کنترل‌کننده جریان، مقدار مرجع ولتاژ ترمینال ac (یعنی ولتاژ v_{an}^*) را مشخص نموده و سپس به واحد تخصیص‌دهنده شکل موج مدولاسیون پل‌ها (شکل ۲-ج) اعمال می‌شود.

در شکل ۲-ج، نحوه تخصیص شکل موج مدولاسیون میان پل‌ها آمده و همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در ابتدا ضرایب M_1 و M_2 از طریق مقایسه ولتاژ لینک dc هر پل با مرجع ولتاژ مطلوب تعیین می‌شود (لازم به توضیح است که در کنترل‌کننده جریان، مجموع ولتاژ لینک‌های dc یعنی $\sum_{j=1}^3 V_{dcj}$ به مقدار مرجع $\sum_{j=1}^3 V_{dcj}^*$ تنظیم شده است، لذا دیگر نیازی به کنترل‌کننده PI برای تنظیم ولتاژ dc پل سوم نخواهد بود). پس از مشخص شدن ضرایب M_1 و M_2 ، شکل موج ولتاژ مرجع ac (v_{an}^*) به نسبت ضرایب $M_1/(M_1+M_2+1)$ ، $M_2/(M_1+M_2+1)$ و $1/(M_1+M_2+1)$ بین پل‌های اول، دوم و سوم تقسیم می‌شود. بنابراین با انتخاب نسبت‌های فوق، ضمن دستیابی به هدف تولید ولتاژ ac در ترمینال خروجی، تنظیم لینک‌های dc در مقدار مرجع برآورده شده است. همچنین رابطه میان ضرایب مدولاسیون سلول‌ها و ضرایب M_1 و M_2 به شکل زیر است

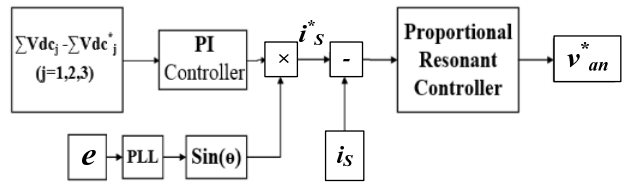
$$\begin{aligned} |s_1| &= \frac{M_1}{M_1 + M_2 + 1} \\ |s_2| &= \frac{M_2}{M_1 + M_2 + 1} \\ |s_3| &= \frac{1}{M_1 + M_2 + 1} \end{aligned} \quad (10)$$

۴- ارائه نتایج شبیه‌سازی

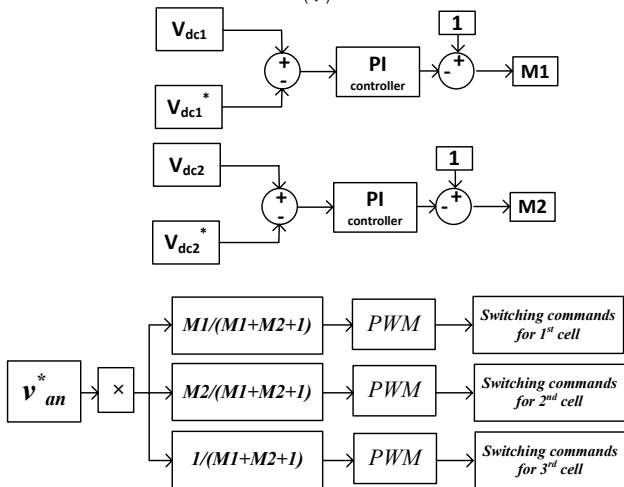
در این بخش کارایی اینورتر پل متوالی متصل به شبکه (که کنترل‌کننده‌های آن بر اساس شکل ۲ پیاده‌سازی شده است) در محیط Matlab Simulink مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهای سیستم مورد



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: شمای کلی سیستم کنترل جریان و سیستم کنترل ولتاژ آرایه‌ها، (الف) بلوک دیگرام سیستم ردیاب بیشینه توان و تولید ولتاژ مرجع پل‌ها، (ب) بلوک دیگرام سیستم کنترل جریان و (ج) بلوک دیگرام سیستم تخصیص شکل موج مدولاسیون بین پل‌ها.

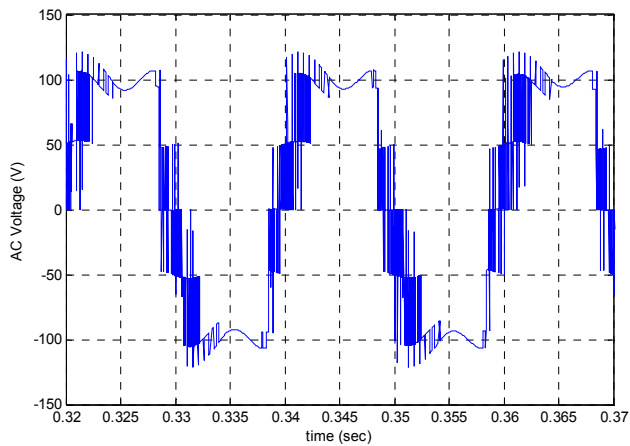
حال با جایگذاری مقدار $|i_s^*|$ از (۷) در (۸) به بیان دیگری از رابطه پایداری خواهیم رسید. رابطه (۹) شرط پایداری سیستم را از روی مقادیر ولتاژ و جریان آرایه‌های خورشیدی نشان می‌دهد

$$|s_j| = \frac{I_{pvj} |e|}{I_{PV1} V_{PV1} + I_{PV2} V_{PV2} + I_{PV3} V_{PV3}} \leq 1 \quad (9)$$

این رابطه نشان می‌دهد که در صورت افت توان در یکی از آرایه‌ها، مخرج کسر کاهش یافته و باعث افزایش ضریب مدولاسیون سلول‌های پرتوان می‌شود. در صورت کاهش بیش از حد توان یکی از آرایه‌ها، ضریب مدولاسیون سلول‌های پرتوان می‌تواند به مقداری بیشتر از ۱ افزایش یافته و در نتیجه سامانه ناپایدار خواهد شد. منظور از ناپایداری افزایش قابل توجه هارمونیک‌های جریان تزریقی به شبکه است.

مطابق شکل ۲، سیستم کنترل پیشنهادی از سه بخش ردیاب بیشینه توان و تولید ولتاژ مرجع پل‌ها (شکل ۲-الف)، کنترل‌کننده جریان (شکل ۲-ب) و بخش تخصیص شکل موج مدولاسیون در بین پل‌ها (شکل ۲-ج) تشکیل شده است.

در این مقاله به دلیل استفاده از اینورتر سطحی پل متوالی، سه لینک dc مجزا در دسترس خواهد بود و هر لینک dc به یک رشته از آرایه‌های خورشیدی متصل خواهد شد. لذا بخش ردیاب نقطه توان بیشینه و تولید



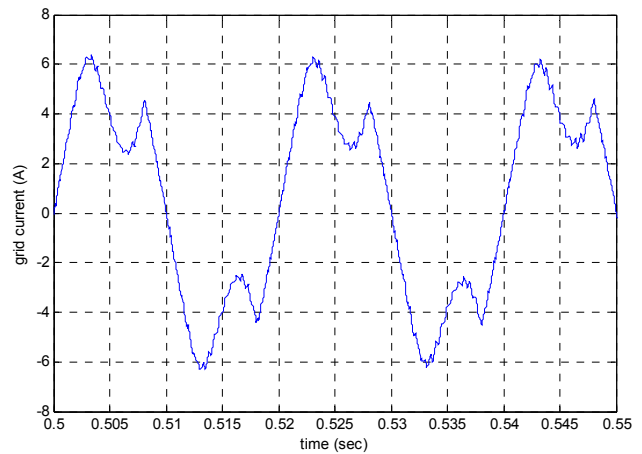
شکل ۵: ولتاژ ترمینال ac در اینورتر ۷ سطحی با دنبال کننده نقطه توان بیشینه عادی.

جدول ۲: پارامترهای مدول فتوولتائیک.

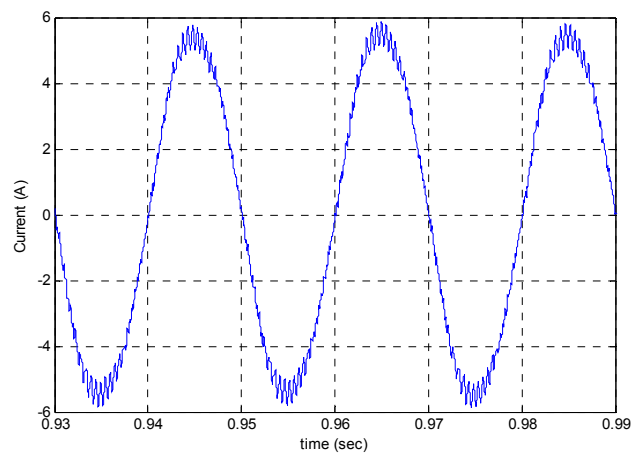
پارامتر	نماد	مقدار
پارامترهای الکتریکی	V_{OC}	۲۰/۸ V
مدول در شرایط تست استاندارد	I_{SC}	۲/۹۸ A
مدول در شرایط تست استاندارد	P_{max}	۴۰ W
پارامترهای مدل نمای ساد	V_{mpp}	۱۶/۳ V
مدول خورشیدی	I_{mpp}	۲/۴۵ A
مدول خورشیدی	I_{pho}	۲/۹۸ A
مدول خورشیدی	I_{so}	۹/۲۳ nA
مدول خورشیدی	η	۱/۱۳۶
مدول خورشیدی	R_s	۰/۵۰۳ Ω
مدول خورشیدی	R_p	۷۲۶ Ω

شبیه‌سازی‌ها به این نحو انجام شده‌اند که بتوان مقایسه‌ای میان روش ردیابی عادی و روش ردیابی اصلاح شده داشت. برای این منظور در ابتدا روش ردیابی عادی به اینورتر اعمال می‌شود و در لحظه $t = 0.8$ ثانیه، روش ردیابی به فرم اصلاح شده تغییر می‌یابد. ضمناً چالش اصلی سیستم کنترل در مواقعی است که آرایه‌های خورشیدی متصل به لینک‌های dc شرایط تابش نامتقارنی داشته باشند. از این رو در این شبیه‌سازی‌ها فرض می‌شود که شدت تابش آرایه‌های متصل به پل‌های اول و دوم 1000 W/m^2 و شدت تابش آرایه خورشیدی متصل به پل سوم 450 W/m^2 باشد.

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد شرایط شبیه‌سازی، شکل موج‌های حالت دائمی جریان تزریقی به شبکه قبل و بعد از اعمال روش اصلاح شده نشان داده می‌شوند. شکل ۳ مربوط به جریان تزریقی در روش ردیابی عادی و شکل ۴ مربوط به جریان تزریقی در روش اصلاح شده است. همان طور که مشاهده می‌شود میزان اعوجاج هارمونیک جریان تزریقی از ۳۸ درصد در حالت استفاده از دنبال کننده نقطه توان بیشینه عادی به ۲۹ درصد در حالت استفاده از دنبال کننده نقطه توان بیشینه اصلاح شده کاهش یافته است. به عبارتی در صورت عدم استفاده از روش اصلاح شده، امکان اتصال سامانه خورشیدی به شبکه وجود نداشته و بایستی سامانه خورشیدی از شبکه جدا شود (مطابق استاندارد هارمونیک جریان تزریقی به شبکه نباید از حد مشخصی مثلاً ۵ درصد بیشتر باشد). در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب ولتاژ ac تولید شده توسط اینورتر پل متوالی ۷ سطحی قبل و بعد از اعمال روش اصلاح شده نشان داده شده تا بتوان به منطق کاری اینورتر در شرایط تابشی نامتقارن پی برد.



شکل ۳: جریان تزریقی به شبکه در حالت نامتقارن و استفاده از دنبال کننده نقطه توان بیشینه عادی.

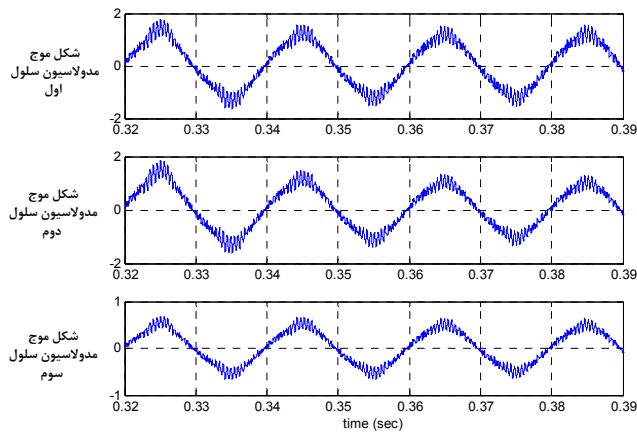


شکل ۴: جریان تزریقی به شبکه در حالت نامتقارن و استفاده از دنبال کننده نقطه توان بیشینه اصلاح شده.

جدول ۱: پارامترهای سیستم مورد مطالعه در شبیه‌سازی.

پارامتر	نماد	مقدار
دامنه ولتاژ شبکه	E_{max}	۱۲۰ V
فرکانس شبکه	F	۵۰ Hz
خازن باس dc	C_{dc}	۱ mF
سلف فیلتر	L	۱ mH
فرکانس کلیدزنی	f_{sw}	۱ kHz
تعداد مدول‌های سری هر رشته	N_s	۳
تعداد مدول‌های موازی هر رشته	N_p	۱
حداکثر توان تحویلی به شبکه	P_{tot}	۳۶۰ W
ضرایب کنترلرهای PI	Kp	۰/۰۱
	Ki	۱۵
ضرایب کنترل کننده جریان PR	Kp	۰/۱
	Ki	۱۵۰

بررسی و همین طور ضرایب استفاده شده برای کنترل کننده‌ها در جدول ۱ و پارامترهای مدول خورشیدی در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در این بررسی، لینک dc هر سلول تمام پل به یک آرایه خورشیدی که خود از سه مدول سری ساخته شده، اتصال یافته است. ضمناً شبیه‌سازی مدول‌های خورشیدی بر اساس مدل تک‌دیودی [۱۵] و روش ردیابی انتخاب شده از نوع اغتشاش و مشاهده [۱۶] می‌باشد.



شکل ۸: شکل موج‌های مدولاسیون مربوط به سه سلول در حالت استفاده از روش دنبال‌کننده اصلاح‌شده.



شکل ۹: تصویر مجموعه آزمایشگاهی برای تست اینورتر γ سطحی پل متوالی.

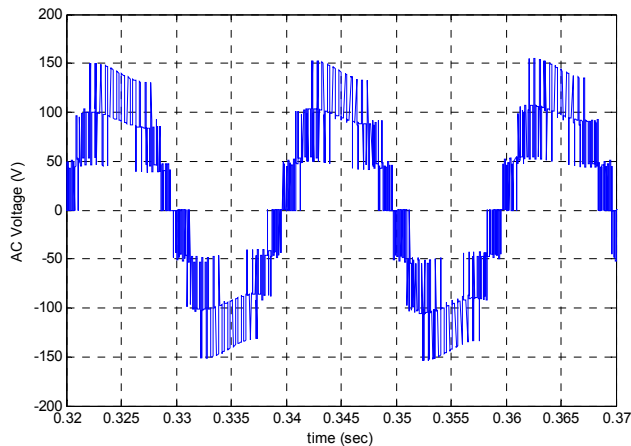
۵- ارائه نتایج آزمایشگاهی

در این بررسی از یک مبدل γ سطحی پل متوالی به همراه مدار حسگرها و پردازنده DSP جهت تأیید نتایج تئوری و شبیه‌سازی استفاده شده است. تصویر مجموعه آزمایشگاهی در شکل ۹ آمده است.

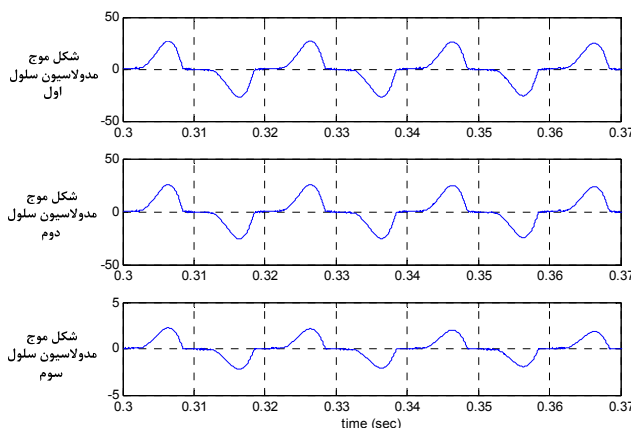
لازم به توضیح است که مدول‌های خورشیدی استفاده‌شده در آزمایش از نوع مدول پلی‌کریستالین بوده و به دلیل گذشت زمان نسبتاً طولانی از عمر آنها، دچار افت عملکرد شده و پارامترهای الکتریکی آنها کمی تغییر نموده است. در شرایط عملی، هر مدول دارای ولتاژ مدار باز تقریباً ۱۸ ولت و حداکثر جریان اتصال کوتاه ۲۲ آمپر (با توجه به ساعت تست که در محدوده ۱۱:۳۰ تا ۱۳:۳۰ بوده است) می‌باشد. مقدار ولتاژ متناظر با نقطه توان بیشینه در این حالت ۱۳/۹ ولت و جریان متناظر با نقطه کار توان بیشینه ۱۹ آمپر است. ضمناً توان بیشینه هر مدول در حین آزمایش تقریباً ۲۶/۵ وات است که با توجه به استفاده از ۹ سلول در سه ردیف سه‌تایی توان بیشینه ۲۴۰ وات می‌شود و پارامترهای سیستم آزمایشگاهی در جدول ۳ نشان داده شده است.

در آزمایش اول، آرایه‌های متصل به سلول‌های تمام پل در حالت متقارن قرار داشته و سامانه خورشیدی از طریق یک ترانس افزایشنده به شبکه وصل شده و به آن توان می‌دهد. شکل موج‌های ولتاژ شبکه، جریان تزریقی به شبکه و ولتاژ و جریان خروجی یکی از آرایه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. ضمناً مقادیر ولتاژ و جریان نقطه کار بیشینه تک‌تک آرایه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

مطابق شکل ۱۰، شکل جریان سینوسی و هم‌فاز با ولتاژ منبع است. با توجه به دامنه جریان تزریقی یعنی ۴/۳ آمپر و دامنه ولتاژ منبع یعنی ۱۰۹ ولت، میزان توان تزریقی ۲۳۵ وات یا به طور متوسط ۷۸/۱ وات برای هر آرایه و ۲۶ وات برای هر مدول می‌شود. همچنین بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هارمونیک جریان تزریقی به شبکه حدود



شکل ۶: ولتاژ ترمینال ac در اینورتر γ سطحی در حالت استفاده از دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه اصلاح‌شده.



شکل ۷: شکل موج‌های مدولاسیون مربوط به سه سلول در حالت استفاده از روش دنبال‌کننده عادی.

همان‌طور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود با استفاده از دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه اصلاح‌شده، اینورتر قادر است همچنان شکل موج γ سطحی در ترمینال ac اینورتر تولید کند و در نتیجه تزریق جریان به شبکه با میزان اعوجاج بسیار کمتری ادامه یابد. ضمناً تزریق جریان تقریباً سینوسی و با اعوجاج کم به شبکه نیاز به فیلتر بزرگ در خروجی اینورتر را از بین می‌برد که این به نوبه خود باعث کاهش قیمت سیستم، بهبود عملکرد و افزایش بازده مبدل می‌شود.

نهایتاً در شکل‌های ۷ و ۸ شکل موج‌های مدولاسیون سلول‌ها (s_r) در دو حالت روش کنترل معمولی و روش کنترل اصلاح‌شده نشان داده می‌شود تا اصول عملکرد روش پیشنهادی بیشتر نمایان شود.

همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود در شرایط نامتقارن، شکل موج مدولاسیون سلول‌ها کاملاً از یک بیشتر شده و وارد ناحیه فرامدولاسیون می‌شوند. اما مطابق شکل ۸ در روش دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه اصلاح‌شده، با جابجایی نقطه کار سلول‌ها، ضرایب مدولاسیون پس از چند سیکل کاری به ۱ محدود می‌شوند (بخش انتهایی شکل موج‌های نشان داده شده در شکل ۸ را ببینید) و از همین رو تأثیر این روش روی ولتاژ تولیدشده در خروجی اینورتر γ سطحی و جریان تزریقی به شبکه مشهود است. ضمناً مشاهده می‌شود که هم‌زمان با محدود شدن ضرایب مدولاسیون به ۱، کیفیت ولتاژ γ سطحی تولیدشده بهبود می‌یابد و جریان تزریقی به شبکه نیز به حالت سینوسی نزدیک‌تر می‌شود و اعوجاج هارمونیک آن کاهش می‌یابد.

جدول ۳: پارامترهای سیستم آزمایشگاهی.

پارامتر	نماد	مقدار
ولتاژ مؤثر شبکه	E_{rms}	۸۰ V
اندوکتانس فیلتر جریان	L	۴ mH
خازن لینک dc	C_{pv}	۱ mF
ولتاژ نقطه توان بیشینه یک مدول	V_{mpp}	۱۳/۹ V
جریان نقطه توان بیشینه یک مدول	I_{mpp}	۱/۹ A
ولتاژ مدار باز یک مدول	V_{OC-PV}	۱۸ V
جریان اتصال کوتاه یک مدول	I_{SC-PV}	۲/۲ A
بیشینه توان یک مدول	P_{max-PV}	۲۶/۵ W
تعداد مدول‌های سری هر رشته	N_s	۳
تعداد مدول‌های موازی هر رشته	N_p	۱
حداکثر توان تحویلی به شبکه	P_{tot}	۳۶۰ W

جدول ۴: مقادیر ولتاژ و جریان سلول‌ها و شبکه.

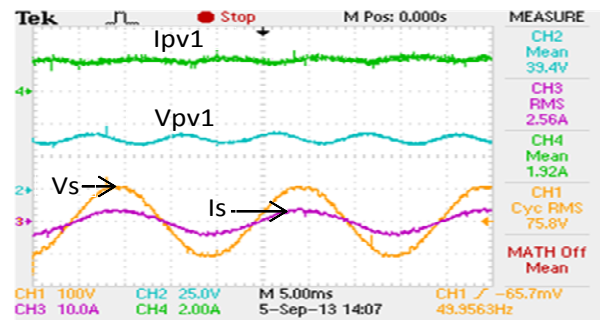
پارامتر	نماد	مقدار
ولتاژ نقطه توان بیشینه سلول اول	V_{mppPV1}	۳۹/۴ V
جریان نقطه توان بیشینه سلول اول	I_{mppPV1}	۱/۸۲ A
ولتاژ نقطه توان بیشینه سلول دوم	V_{mppPV2}	۳۸/۱ V
جریان نقطه توان بیشینه سلول دوم	I_{mppPV2}	۱/۷۵ A
ولتاژ نقطه توان بیشینه سلول سوم	V_{mppPV3}	۳۸/۸ V
جریان نقطه توان بیشینه سلول سوم	I_{mppPV3}	۱/۷۱ A
ولتاژ مؤثر شبکه	$V_{GridRMS}$	۷۵/۸ V
جریان مؤثر شبکه	$I_{GridRMS}$	۲/۵۶ A

داده شده است. با مقایسه شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توان ملاحظه نمود که در روش پیشنهادی با افزایش ولتاژ مرجع سلول‌های پرتوان و جابه‌جایی نقطه کار سلول‌ها، اینورتر شکل موج جریان را اصلاح نموده و اعوجاج هارمونیک جریان را کم می‌نماید تا حدی که ملزومات بیان شده در استانداردهای مختلف تأمین شود.

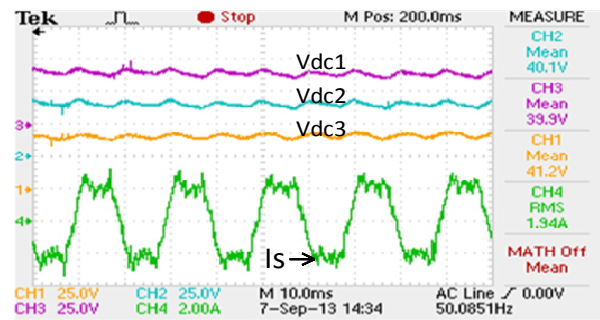
شکل ۱۳ جریان تزریقی به شبکه و طیف هارمونیک آن را در دو حالت استفاده از دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه عادی و اصلاح‌شده در کنار هم نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که اعوجاج هارمونیک جریان تزریقی به شبکه در حالت نامتقارن و با استفاده از دنبال‌کننده عادی حدود ۷۸ درصد است که در این حالت ادامه فعالیت سیستم فتوولتائیک ممکن نمی‌باشد و باید از مدار جدا شود. اما با استفاده از دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه اصلاح‌شده هارمونیک جریان به ۴/۸ درصد کاهش می‌یابد. در این حالت جریان سینوسی با اعوجاج هارمونیک کم که ملزومات استاندارد را برآورده می‌سازد به شبکه تزریق می‌شود.

در توجیه مطالب اخیر باید گفت که اینورترهای ۷ سطحی مرسوم در شرایط تابش نامتقارن آرایه‌ها قادر به ایجاد ولتاژ ۷ سطحی نیستند اما با اعمال ردیاب نقطه توان بیشینه اصلاح‌شده، اینورتر قادر به تولید ولتاژ ۷ سطحی در خروجی می‌داند و با تولید چنین ولتاژی میزان THD جریان تزریقی تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

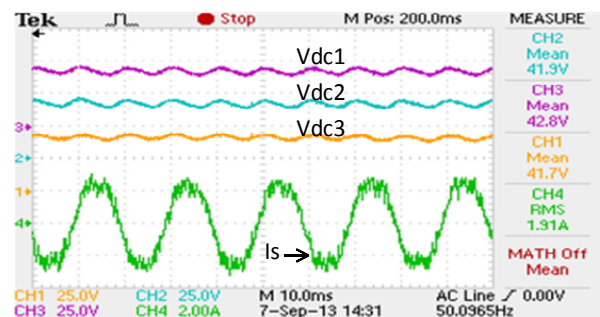
نهایتاً در شکل ۱۴ نمودار ولتاژ شبکه، جریان شبکه و ولتاژ یکی از آرایه‌ها در حالت شرایط کاری نامتقارن و در حین اعمال روش اصلاح‌شده نشان داده شده است. از شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود که جریانی هم‌فاز با شبکه، کاملاً سینوسی و اعوجاج هارمونیک حداکثر ۴/۸ درصد شرایط را برای کار پایدار مهیا ساخته است.



شکل ۱۰: ولتاژ شبکه، جریان تزریقی به شبکه، ولتاژ یکی از آرایه‌ها و جریان کشیده‌شده از یکی از آرایه‌ها در حالت کار متقارن.



شکل ۱۱: نمودار جریان تزریقی به شبکه و ولتاژ آرایه‌ها با استفاده از دنبال‌کننده عادی در حالت عدم تقارن.

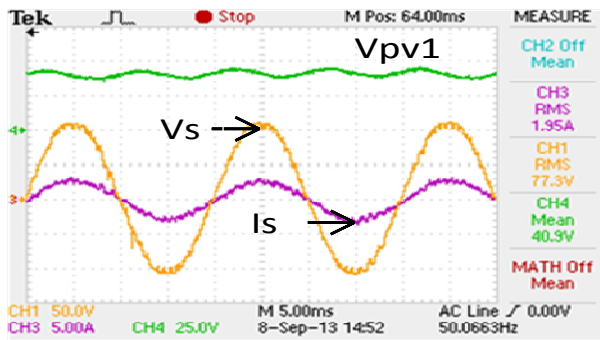


شکل ۱۲: نمودار جریان تزریقی به شبکه و ولتاژ آرایه‌ها با استفاده از دنبال‌کننده اصلاح‌شده در حالت عدم تقارن.

۳ درصد و بازده میدل حدود ۹۵ درصد است که در مقایسه با اینورتر دوسطحی معرفی‌شده در [۱۴] (با بازده تقریبی ۹۲ درصد و هارمونیک جریان ۱۲ درصد)، میدل پیشنهادی عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. علاوه بر این باید توجه داشت که در اینورترهای مرسوم (علی‌رغم استفاده از فیلترهای LC درجه دو)، هارمونیک جریان تزریقی به شبکه بیشتر از زمانی است که از میدل‌های چندسطحی استفاده می‌کنیم.

با پیاده‌سازی شرایط متقارن و تأیید عملکرد دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه و گرفتن حداکثر توان از آرایه‌ها در حالت متقارن به سراغ پیاده‌سازی شرایط نامتقارن و تأیید صحت عملکرد دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه در حالت نامتقارن (سایه جزئی) می‌پردازیم. در این حالت از طریق قراردادن طلق آبی روی مدول‌های خورشیدی، شدت تابش نور را برای یکی از آرایه‌ها کاهش می‌دهیم. با کاهش شدت نور آرایه، جریان اتصال کوتاه آن نیز کاهش یافته و در نتیجه بیشینه توان خروجی آرایه کاهش می‌یابد. به وسیله این سایه مصنوعی، می‌توان شرایط سایه جزئی را مدل کرد.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، جریان تزریقی به شبکه و ولتاژ آرایه‌ها با استفاده از دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه عادی و اصلاح‌شده در شرایطی که آرایه خورشیدی متصل به سلول سوم دچار سایه مصنوعی شده، نشان

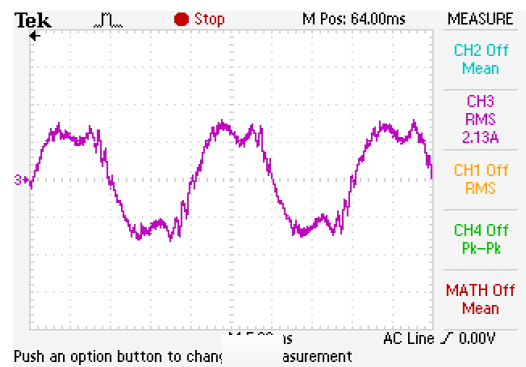


شکل ۱۴: نمودار ولتاژ شبکه، جریان شبکه و ولتاژ یکی از آرایه‌ها در حالت پایدار در شرایط نامتقارن با اعمال روش اصلاح‌شده.

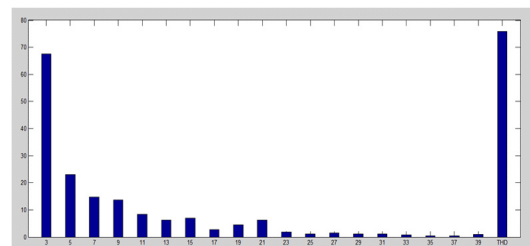
پیاپیاده‌سازی شدند. نتایج آزمایشگاهی نیز دلالت بر موفقیت روش پیشنهادی و کارابودن آن در شرایط عملکرد نامتقارن آرایه‌ها دارد. استفاده از روش پیشنهادی این امکان را به وجود می‌آورد که حتی در شرایط سایه جزئی و شرایط نامتقارن، اینورتر را از شبکه جدا نکرد و به تزریق توان ادامه داد.

مراجع

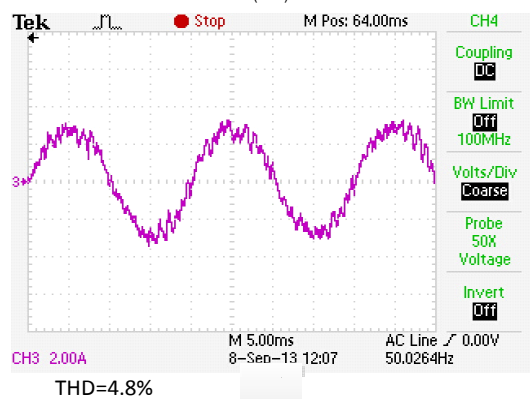
- [1] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid connected inverters for photovoltaic modules," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sep./Oct. 2005.
- [2] J. Rodriguez, L. Jih-Sheng, and P. Fang Zheng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002.
- [3] L. Liu, H. Li, Y. Xue, and W. Liu, "Reactive power compensation and optimization strategy for grid-connected cascaded photovoltaic systems," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, pp. 188-202, Jan. 2015.
- [4] S. Daher, J. Schmid, and F. L. M. Antunes, "Multilevel inverter topologies for stand-alone PV systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2703-2712, Jul. 2008.
- [5] L. Liu, H. Li, Y. Xue, and W. Liu, "Decoupled active and reactive power control for large-scale grid-connected photovoltaic systems using cascaded modular multilevel converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, pp. 176-187, Jan. 2015.
- [6] ع. اسکندری قادی، تحلیل و کنترل اینورتر چندسطحی تمام پل متوالی نامتقارن برای سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، بهمن ۱۳۹۱.
- [7] A. Dell'Aquila, M. Liserre, V. G. Monopoli, and P. Rotondo, "Overview of PI-based solutions for the control of DC buses of a single-phase H-bridge multilevel active rectifier," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, pp. 857-866, May 2008.
- [8] C. Cecati, F. Ciancetta, and P. Siano, "A multilevel inverter for photovoltaic systems with fuzzy logic control," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4115-4125, Dec. 2010.
- [9] E. Villanueva, P. Correa, J. Rodriguez, and M. Pacas, "Control of a single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4399-4406, Nov. 2009.
- [10] M. A. Rezaei, H. Iman-Eini, and S. Farhangi, "Grid connected photovoltaic system based on a cascaded H-bridge inverter," *J. of Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 578-586, Jul. 2012.
- [11] S. Khomfoi and C. Aimsaard, "A 5-level cascaded hybrid multilevel inverter for interfacing with renewable energy resources," in *Proc. of 6th Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON*, vol. 1, pp. 284-287, Pattaya, Thailand, 6-9 May 2009.
- [12] L. M. Tolbert and F. Z. Peng, "Multilevel converters as a utility interface for renewable energy systems," in *Proc. of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 1271-1274, Seattle, US, 16-20 Jul. 2000.
- [13] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, and M. A. Perez, "A survey on cascaded multilevel inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2197-2206, Jul. 2010.
- [14] H. Cha, T. K. Vu, and J. E. Kim, "Design and control of proportional-resonant controller based on photovoltaic power



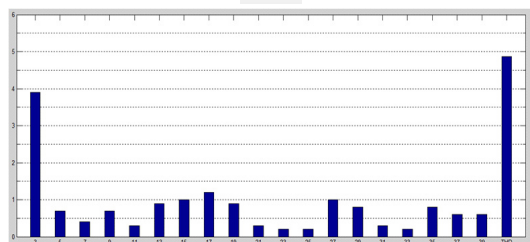
THD=78%



(الف)



THD=4.8%



(ب)

شکل ۱۳: نمودار جریان تزریقی به شبکه و طیف هارمونیک آن در حالت نامتقارن، (الف) روش عادی و (ب) روش اصلاح‌شده.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای کنترل سامانه‌های خورشیدی متصل به شبکه توسط مبدل‌های چندسطحی پل متوالی تک‌فاز ارائه شد. این روش بر مبنای جابجایی نقطه کار آرایه‌های خورشیدی در شرایط نامتقارن و ناپایدار تا رسیدن به مرز پایداری طراحی شده است. ضمناً به صورت تحلیلی رابطه‌ای که بیانگر مرز پایداری سلول‌های تمام پل می‌باشد استخراج شد و صحت عملکرد روش پیشنهادی با نتایج شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گرفت. نتایج به دست آمده دلالت بر عملکرد صحیح دنبال‌کننده نقطه توان بیشینه پیشنهادی دارد. همچنین یک نمونه آزمایشگاهی از مبدل ۷سطحی پل متوالی طراحی و ساخته شد و روش‌های کنترلی استفاده‌شده در شبیه‌سازی به صورت عملی روی آنها

مهرآز امینی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق، گرایش قدرت، به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ در دانشکده فنی دانشگاه تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری مهندسی برق در گروه سیستم‌های پیچیده دانشگاه ایالتی ورمونت ایالت متحده آمریکا می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده عبارتند از: سیستم‌های قدرت، بهینه‌سازی، مدلسازی سیستم‌های انرژی و سیستم‌های کنترل غیر متمرکز.

شاهرخ فرهنگی به ترتیب در سال ۱۳۵۰، ۱۳۵۲ و ۱۳۷۳ مدرک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق را از دانشکده فنی دانشگاه تهران دریافت نمود. او در حال حاضر رییس دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران است. علایق پژوهشی او شامل طراحی و مدل سازی مبدل‌های الکترونیک قدرت، محرکه‌ها، فتوولتائیک‌ها، و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. او بیش از ۱۰۰ مقاله در مجموعه مقالات کنفرانس‌ها و مجلات به چاپ رسانده است. پروفیسور فرهنگی به عنوان مهندس برجسته در مهندسی برق توسط آکادمی علوم در سال ۱۳۸۷ انتخاب شد.

conditioning system," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2198-2205, San Jose, US, 20-24 Sep. 2009.

- [15] V. D. Dio, D. L. Casica, and R. Miceli, "A mathematical model to determine the electrical energy production in photovoltaic fields under mismatch effect," in *Proc. IEEE Conf. on Clean Electrical Energy*, pp. 46-51, 9-11 Jun. 2009.
- [16] V. Salas, E. Oltas, A. Barrado, and A. Lazaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 9, no. 11, pp. 1555-1578, Jul. 2006.

حسین ایمان عینی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۲ در دانشکده فنی دانشگاه تهران به پایان رسانده و مدرک دکتری خود را به صورت دوره دکتری مشترک از دانشگاه پلی‌تکنیک-گرونوبل فرانسه و دانشگاه تهران در سال ۱۳۸۷ دریافت نمود. نامبرده از سال ۱۳۸۸ در دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تهران مشغول به فعالیت گردید و اینک عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مبدل‌های چندسطحی، کاربرد الکترونیک قدرت در سیستم‌های قدرت و انرژی‌های نو.