

ارائه ساختار بهبود یافته برای حذف جریان نشتی در مبدل اینورتری فتوولتائیک بدون ترانسفورماتور

محمدرضا اصغری^۱، هادی ثقفی اصفهانی^۲

^۱ دانشجوی رشته برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان ایران، mohamadrezasaghari70@gmail.com

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، گروه برق، اصفهان ایران، h.saghafi@khuisf.ac.ir

چکیده - در این مقاله ساختار بهبود یافته‌ای برای اینورترهای متصل به شبکه بدون ترانسفورماتور ارائه خواهد شد. همچنین در مورد حذف جریان نشتی زمین از طریق یک تکنیک مدولاسیون که در آن مولفه هارمونیک سوم با مدولاسیون پهنای پالس تغییر فاز یافته چند حاملی که در توپولوژی اینورتر PV متصل به شبکه بدون ترانس پنج سطحی تمام پل تک فاز بهبود یافته به کار رفته است تزیق می‌شود؛ بحث می‌کنیم. اینورتر تمام پل تک فاز برای تولید خروجی پنج سطحی از طریق افزوده شدن یک سوئیچ اضافی در سمت DC به کار گرفته می‌شود. مزیت‌های سیستم پیشنهادی این خواهد بود که این سیستم محتوای هارمونیک پایین تری را در جریان شبکه ایجاد می‌کند و جریان های نشتی در حدهای مجاز ایمن تری مشاهده می‌شود.

کلید واژه - جریان نشتی، مدولاسیون SPWM، سیستم فتوولتائیک، اتصال بدون ترانسفورماتور

۱- مقدمه

شده که این اینورترها برپایه‌ی تریستورها عمل می‌کردند. پس از آن در سال ۱۹۹۰ اولین سری از اینورترهایی که به وسیله‌ی SMA تولید گردید توسط ترانزیستورها عمل می‌کردند. در اواسط سال ۱۹۹۰ میلادی فصل جدیدی در اینورترها آغاز در بخش اعظم اینورترها MOSFET, IGBT شد و به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفتند [۱].

یک مبدل DC-DC به منظور افزایش بازده در قسمت مبدل ترانسفورمر فرکانس بالا و یا در خروجی یک ترانسفورمر فرکانس پایین قرار می‌گیرد [۱۴]. بنابراین در توان های پایین و متوسط و برای مصارف خانگی از ساختارهای بدون ترانسفورمر و در قسمتهایی که به توان های بالا نیاز باشد از ساختارهای ترانسفورمر دار استفاده می‌شود [۱۴].

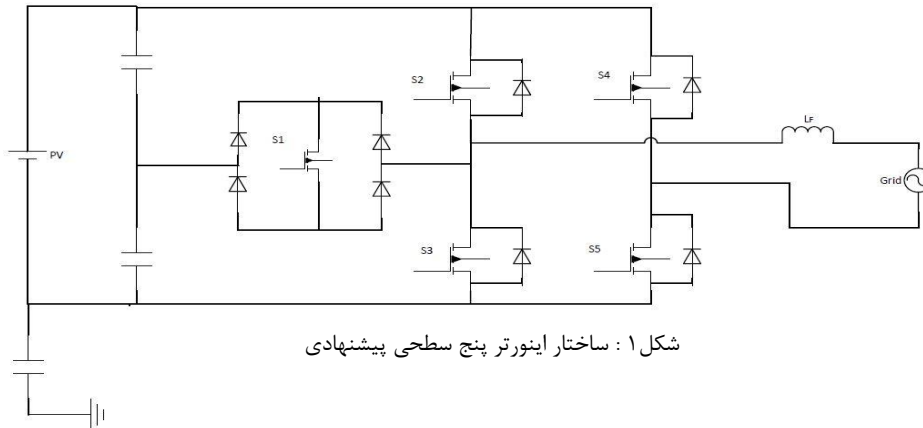
این مقاله تلاشی در جهت بررسی پیکربندی‌های مختلف مبدل‌های متصل به شبکه بدون ترانسفورماتور برای پانل خورشیدی و ارائه روش کنترلی و ساختار مناسب برای کاهش جریان نشتی و بهبود عملکرد اینورتر می‌باشد.

رویکرد دیگر برای حذف جریان نشتی از طریق استفاده از یک تکنیک مدولاسیون کارآمد است و هنگامی که به سطوح ولتاژ بالاتر می‌رویم حالت ولتاژ صفر کاهش می‌یابد. در تحقیقات و

با توجه به نیاز روز افزون بشر به انرژی الکتریکی و همچنین هزینه بالای تهیه انرژی الکتریکی از سوخت‌های فسیلی و سایر روش‌ها، امروزه انرژی‌های تجدید پذیر و در راس آنها انرژی خورشیدی در کانون توجه بشر به عنوان یک منبع جدید انرژی برای استفاده قرار گرفته است. در این میان از آنجایی که ولتاژ خروجی سلول خورشیدی قابل استفاده در مصارف عمومی خانگی و صنعتی باشد، باید بصورت متناوب در بیاید. مبدل‌های مختلف وظیفه تبدیل برق یکسو به متناوب را بر عهده دارند. با توجه به مشکلات و هزینه های استفاده از ترانسفورماتور، امروزه استفاده از مبدلهای بدون ترانسفورمر بسیار رایج شده است. انواع مبدل-های بدون ترانسفورماتور هر کدام دارای ویژگی‌ها و مزایا و معایبی می‌باشند. در مطالعات قبلی انجام شده ساختارهایی برای این هدف ارائه شده‌اند و هر کدام دارای معایبی از جمله وجود جریان نشتی می‌باشند [۱].

ساختارهای متفاوتی برای اینورترهای متصل به شبکه استفاده می‌شود که هر یک دارای خصوصیتی می‌باشند. اولین اینورترهای متصل به شبکه در سال ۱۹۸۰ میلادی ساخته

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

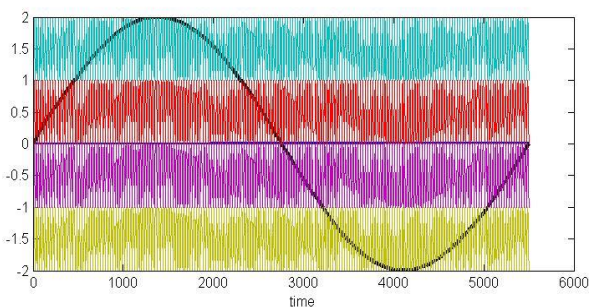


۲-۱ اینورتر ۵ سطحی

تکنیک های پیشنهادی موجب کاهش قابل توجه جریان نشتی و ایجاد محتوای هارمونیک کم در خروجی جریان شبکه می شوند.

تکنیک مدولاسیون پیشنهادی یک SPWM است که دارای چهار حامل شیفت فاز یافته می باشد. که هر حامل محدوده خود را دارد؛ به این صورت که از دامنه ۱ تا ۲-۱ مربوط به حامل اول، از دامنه ۱- تا صفر مربوط به حامل دوم، از دامنه صفر تا ۱ مربوط به حامل سوم و از دامنه ۱ تا ۲ مربوط به حامل چهارم می باشد. (شکل ۲) نحوه مقایسه سیگنال مرجع را با حامل ها نشان داده است.

شکل ۲: نحوه مقایسه سیگنال مرجع با چهار حامل در ساختار پیشنهادی



(جدول ۱) نشان دهنده نحوه کلید زنی اینورتر در ساختار پیشنهادی می باشد که از طریق آن می توان ۵ سطح مورد نظر را ایجاد نمود.

جدول ۱: حالت های سوئیچینگ تکنیک PWM پیشنهادی

ولتاژ بار	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
-----------	-------	-------	-------	-------	-------

منابع موجود تکنیک های مدولاسیون پهنای پالس بسیاری برای وارونگرهای چند سطحی مانند مدولاسیون پهنای پالس چندحاملی و مدولاسیون پهنای پالس تغییر فازی و غیره ارائه شده اند [۱] ولی این تکنیک ها نمی توانند جریان حالت متعارف را در توپولوژی های اینورتر PV بدون ترانسفورماتور حذف کنند. این کار را می توان از طریق یک روش سوئیچینگ مدولاسیون جدید که تزریق هارمونیک سوم با تکنیک مدولاسیون پهنای پالس چندحاملی تغییر فاز یافته نامیده می شود انجام داد. در ادامه در بخش ۲ به بررسی ساختار اینورتر پیشنهادی و تکنیک مدولاسیون SPWM با چهار حامل پرداخته می شود.

۲-۲ بررسی ساختار اینورتر پیشنهادی

ساختار اینورتر PV بدون ترانسفورماتور متصل به شبکه ی پنج سطحی تک فازی در (شکل ۱) نشان داده شده است. این توپولوژی شامل اینورتر متداول تمام پل همراه با یک سوئیچ اضافی است که در نزدیکی سمت dc قرار دارند. نقش اصلی این سوئیچ اضافی این است که جریان ورودی و خروجی به نول سیستم PV را کنترل می کنند. خازن مجازی نا خواسته ای وجود دارد که بین پانل PV و زمین شکل گرفته است. اگر اینورتر را بین شبکه و پانل PV در طول حالت ولتاژ صفر جدا کنیم جریان نشتی حالت متعارف به میزان زیاد (نزدیک به صفر) کاهش خواهد یافت. توپولوژی های بسیاری مانند توپولوژی تک قطبی نیم پل، توپولوژی HERIC [۲]، توپولوژی ZVR [۳]، H5 [۴]، H6 [۵] و NCP [۶] برای حذف جریان نشتی گسترش یافته اند.

جدول ۲) ارائه شده اند.

جدول ۲: پارامترهای شبیه سازی

پارامتر شبیه سازی	مقدار
القاه گر خط ۱	0/0018H
خازن اتصال DC	3000 μ F
خازن زمین ($C_{1ground}$)	0/1 μ F
خازن های C1 و C2	6mF
ولتاژ ورودی PV	230 V

Vpv	۰	۱	۰	۰	۱
Vpv/2	۱	۰	۰	۰	۱
صفر	۰	۱	۱	۰	۰
صفر	۰	۰	۱	۰	۱
-Vpv/2	۱	۰	۰	۱	۰
-Vpv	۰	۰	۱	۱	۰

۲-۲ جریان ناشی

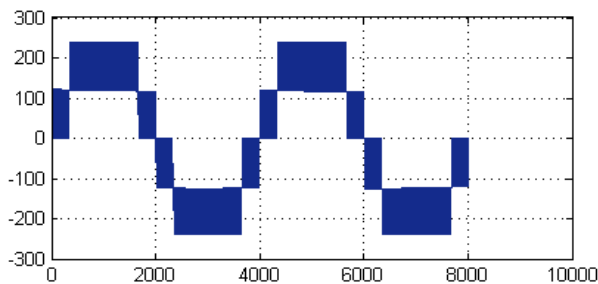
جریان های ناشی از خازن های پراکنده پانل های فتوولتائیک بحث اصلی در حالت متصل به شبکه می باشد. به طوری که به دلیل بحث ایمنی، قابلیت اطمینان، هماهنگی حفاظتی، تداخل الکترومغناطیسی و طول عمر پانل های فتوولتائیک مورد مطلوب نیستند. در ساختارهای با ترانسفورماتور، ایزولاسیون گالوانیکی بین آرایه فتوولتائیک و شبکه وجود داشته و بنابراین می توان به سادگی با زمین کردن قطب منفی پانل فتوولتائیک، جریان ناشی را صفر کرد [۷].

جریان ناشی یکی از معضلات اینورترهای بدون ترانسفورماتور می باشد. در صورت وجود ترانسفورماتور مابین طبقات اینورتر، ایزولاسیون گالوانیکی ایجاد می شود و بنابراین میتوان به سادگی با زمین کردن قطب منفی پانل PV جریان ناشی را صفر کرد [۸].

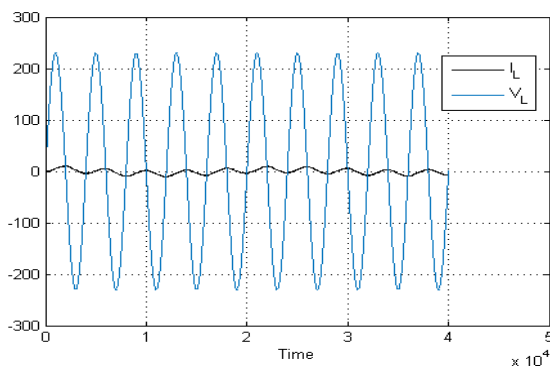
۳- بررسی نتایج و بحث

شبیه سازی ها تحت نرم افزار طراحی سیستم توان به کمک کامپیوتر (MATLAB) انجام شدند تا تکنیک مدولاسیون پیشنهادی اجرا شده در توپولوژی اینورتر PV بدون ترانسفورماتور پنج سطحی تکفازی برای حذف جریان ناشی اعتبارسنجی شود. پارامترهای به کار رفته در شبیه سازی ها در

نتایج شبیه سازی مدار پیشنهادی در نرم افزار MATLAB/SIMULINK در این بخش آورده شده اند.

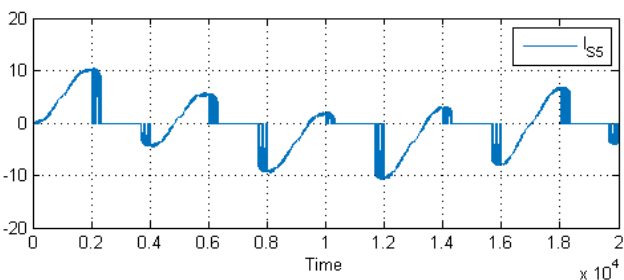
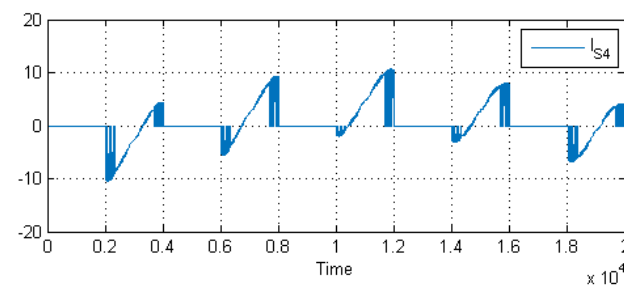
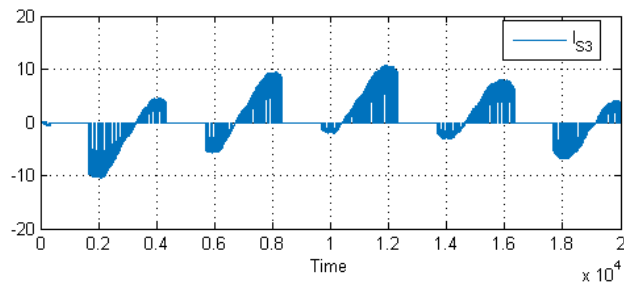
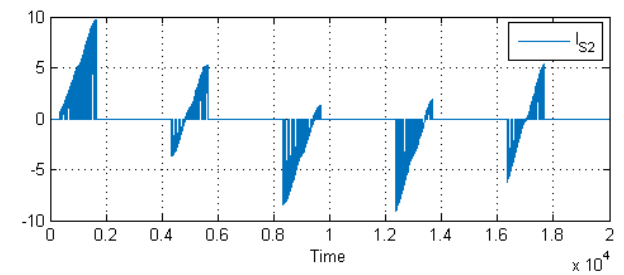
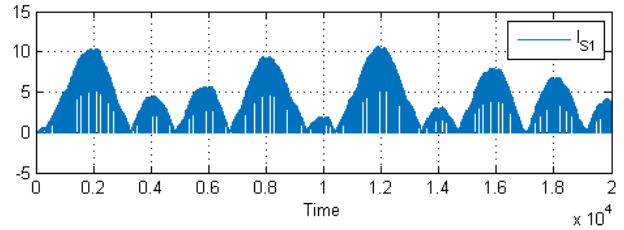


شکل ۳: ولتاژ خروجی اینورتر پیشنهادی

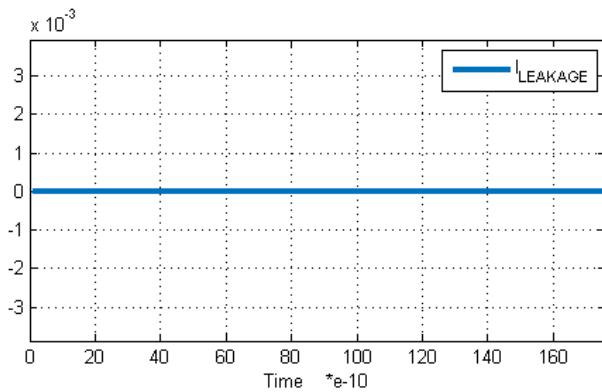


شکل ۴: ولتاژ و جریان در نقطه اتصال به شبکه

شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر پیشنهادی در (شکل ۳) نمایش داده شده است. این ولتاژ خروجی به علت ۵ سطحی بودن دارای THD کمتری نسبت به دیگر ساختارها است. که در حدود ۲۸ درصد می باشد که با نرم افزار اندازه گیری شده است. همچنین ساختار پیشنهادی کمترین اعوجاج را به شبکه منتقل می کند که در (شکل ۴) ولتاژ و جریان اندازه گیری شده در نقطه اتصال به شبکه نشان داده شده است. البته در شبیه سازی ، شبکه با یک منبع ولتاژ سینوسی مدل شده می باشد. پس از شبیه سازی به ازای مقادیر مختلف از پارامترها، فرکانس کلیدزنی برابر با ۱۴ kHz مناسب به نظر رسید، چرا که کمترین THD را ایجاد می کرد. جریان ناشی از اندازه گیری شده در ساختار پیشنهادی به صفر رسیده که در مقایسه با ساختارهای قبلی بهبود یافته و به شکل ایده آل نزدیک شده است. شکل ۵ نشان دهنده جریان ناشی از اندازه گیری شده در محیط MATLAB/SIMULINK می باشد.



شکل ۵: جریان سوئیچ های S1 تا S5



شکل ۴: جریان ناشی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار جدید دارای ۵ سویچ ارائه گردیده که با کلیدزنی خازن، ولتاژ منفی لازم را نیز تولید می‌کند. ساختار جدید دارای ویژگی‌های متعددی می‌باشد، از قبیل تعداد ۵ سویچ به کار رفته و از نظر کارایی شبیه H5، استفاده از یک خازن برای تامین ولتاژ منفی مورد نیاز اینورتر (باس DC مجازی)، برقراری اتصال مستقیم قطب منفی پانل خورشیدی به نقطه نول و حذف کامل جریان نشتی و پی‌آمدهای آن، استفاده از مدولاسیون SPWM تک قطبی و ایجاد شکل موج با THD بسیار پایین، قابلیت اتصال به شبکه تکفاز و تزریق توان اکتیو به شبکه و قابلیت تزریق توان راکتیو به شبکه. در پایان ساختار مذکور به کمک نرم‌افزار MATLAB مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و نتایج مورد بررسی و تایید قرار گرفتند.

مراجع

- [1] نادری، ی: « ارائه ساختار و روش کنترلی مناسب برای اینورترهای چند سطحی به منظور اخذ حداکثر توان از سلول‌های خورشیدی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۵-۲۸، ۱۳۹۲
- [2] Stefanos Saridakis, Eftichios Koutroulis, Frede Blaabjerg, "Optimal Design of Modern Transformerless PV Inverter Topologies" IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 28, NO. 2, JUNE 2013
- [3] M. C. Poliseño, R. A. Mastromauro, M. Liserre, A. Dell'Aquila, "High Efficiency Transformerless PV Power Converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 60, issue 5, Jan. 2013
- [4] Baojian Ji, Jianhua Wang, Jianfeng Zhao, "High-Efficiency Single-Phase Transformerless PV H6 Inverter With Hybrid Modulation Method", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 60, no. 5, May 2013, pp. 2104-2115
- [5] Bo Yang, Wuhua Li, Yunjie Gu, Wenfeng Cui, Xiangning He, "Improved Transformerless Inverter With Common-Mode Leakage Current Elimination for a Photovoltaic Grid-Connected Power System", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, Feb. 2012, pp. 752-762
- [6] Tan Kheng Suan Freddy, Nasrudin A. Rahim, Wooi-Ping Hew, Hang Seng Che "Comparison and analysis of single-phase transformerless Grid-connected pv inverters"
- [7] *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems* Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodríguez, 2011 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-05751-3
- [8] M. C. Cavalcanti, A. M. Farias, K. C. de Oliveira, F. A. S. Neves, and J. L. Afonso, "Eliminating leakage currents in neutral point clamped inverters for photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 435-443, Jan 2012.
- [9] S. Aeaújo, P. Zacharias, and R. Mallwitz, "Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3118-3128, Sep. 2010.
- [10] T. Kerekes, G. Vazquez, R. Teodorescu, P. Rodriguez, and E. Aldabas, "A new high-efficiency single-phase transformerless PV inverter topology," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 184-191, Jan. 2011.
- [11] W. Yu, J.S. Lai, H. Quian, and C. Hutchens, "High-efficiency MOSFET inverter with H6-type configuration for photovoltaic nonisolated AC-module applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1253-1260, Apr. 2011.
- [12] Yunjie Gu, Wuhua Li, Yi Zhao, Bo Yang, Chushan Li, Xiangning He, "Transformerless Inverter With Virtual DC Bus Concept for Cost-Effective Grid-Connected PV Power Systems", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 2, Feb. 2013, pp. 793-805
- [13] M.C. Poliseño, R. A. Mastromauro, M. Liserre, "Transformer-less photovoltaic (PV) inverters: a critical comparison", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*
- [14] M. Kazanbas, L. Menezes, P. Zacharias, "Considerations on Grounding Possibilities of Transformerless Grid-Connected Photovoltaic Inverters", *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*, 9-12 Sept. 2012, IEEE International
- [15] Li Zhang, Kai Sun, Yan Xing, Mu Xing, "H6 Transformerless Full-Bridge PV Grid-tied Inverters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. PP, issue 99, May 2013