



طراحی و شبیه‌سازی اینورتر ۱۳ سطحی تکفاز سلول U

محسن یحیی آبادی^۱، علی اصغر شجاعی^{۲*}، سامان طوسی^۳،
احسان دشتبانی^۴

چکیده

در این مقاله با استفاده از مدولاسیون چند حاملی و سلول U یک اینورتر ۱۳ سطحی تکفاز ارائه شده است. شبیه‌سازی در سیمولینک نرم‌افزار متلب انجام شده است. خروجی ولتاژ و جریان اینورتر در بار ثابت و متغیر در اسکوپ نشان داده می‌شود. هم‌چنین اعوجاج هارمونیک کل یا THD اینورتر محاسبه و نمایش داده می‌شود. روش مدولاسیون چند سطحی یکی از روش‌های رایج در تولید پالس برای کلیدها می‌باشد. معمولاً برای تولید پالس سوئیچ‌ها موج مثلثی حامل با موج مرجع که یک موج سینوسی با فرکانس مطلوب و مورد نظر خروجی می‌باشد مقایسه می‌شود و این پالس‌ها تولید می‌شوند و به سوئیچ‌ها اعمال می‌گردد. در این کار اینورتر ۸ سوئیچ و ۱۲ موج حامل و ۳ منبع تغذیه DC دارد. این کار با اینورتر ۱۳ سطحی CH-B تکفاز مقایسه می‌شود و نشان داده می‌شود که عملکرد اینورتر در این مقاله بهبود داده شده است.

واژگان کلیدی: اینورتر، چند حاملی، سوئیچینگ، مبدل.

- ۱- گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.
- ۲- گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران. (مسئول مکاتبات)
a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir
- ۳- گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.
- ۴- گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران.

۱- مقدمه

اینورترها در مکان‌هایی که ولتاژ DC به عنوان منبع تغذیه می‌باشد، مانند باتری‌ها و پنل‌های خورشیدی، و مصرف‌کننده توسط ولتاژ متناوب یا اصطلاحاً بار AC هست مورد استفاده قرار می‌گیرند، بعبارت دیگر اینورتر عمل معکوس سازی را انجام می‌دهد و ولتاژ DC منبع را به ولتاژ AC با مقدار موثر قابل تنظیم تبدیل می‌کند. البته اینورترهای CH-B با ۴ سوئیچ خیلی مرسوم هستند ولی امروزه با توجه به کاهش قیمت ادوات نیمه هادی اینورترهای چند سطحی جایگزین مناسبی برای تولیدات قدیمی هستند [۱ و ۲ و ۳].

در مقالات تمرکز در روش‌های مدولاسیون است. مولفه‌ی مهم و قابل توجه شامل کاهش قطعات، کاهش پیچیدگی طراحی و ساخت اینورتر می‌باشد. هر چقدر که تعداد کلیدها کاهش پیدا کند تلفات سوئیچینگ و هزینه ساخت کاهش می‌یابد. اینورترهای چند سطحی در کارهای صنعتی مختلف از تک فاز و سه فاز، توان کم، توان متوسط و توان بالا کاربرد دارند [۳-۱۳]. در بیشتر اینورترهای صنعتی از یک یا دو منبع DC استفاده می‌شود. استفاده از منابع DC بیشتر برای افزایش تعداد سطح اینورتر هزینه بر می‌باشد. هر منبع DC در اینورتر یک ترانسفورماتور و یک پل دیودی مجزا نیاز دارد [۱۴-۱۷]. تعدادی از توپولوژی‌های CH-B که منابع مجزای DC دارند در کاربردهای توان بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. تکنولوژی CH-B کمک می‌کند که ولتاژ بین سلول‌ها تقسیم شود از این رو مولفه‌های سوئیچ‌ها می‌تواند ولتاژ متوسط و یا پایین‌تری داشته باشند [۲۰-۲۲].

در این مقاله یک اینورتر ۱۳ سطحی تکفاز با ۸ کلید و ۱۲ کریر و سه منبع ولتاژ طراحی شده است. در نمونه‌ی مشابه که از فناوری CH-B استفاده می‌کند دارای تعداد کلیدهای کمتر و همچنین THD بهتری در ولتاژ و جریان خروجی می‌باشد. در قسمت دوم مدار پیشنهادی برای اینورتر ۱۳ سطحی با ۸ کلید نمایش داده شده است. قسمت سوم به توضیح مدولاسیون چند سطحی و نحوه‌ی تولید پالس برای سوئیچ‌ها می‌پردازد. قسمت چهارم نتایج شبیه‌سازی در بارهای مختلف، محاسبه‌ی THD و مقایسه با اینورتر ۱۳ سطحی CH_B آورده شده است.

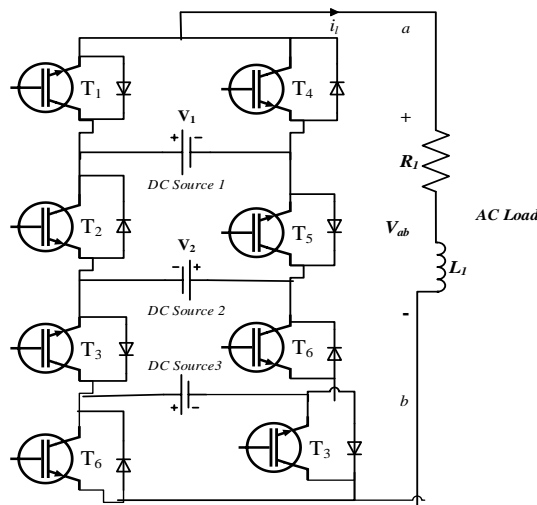
۲- طراحی اینورتر ۱۳ سطحی با کلیدهای کاهش یافته

در این مقاله با استفاده از ۸ سوئیچ و سه منبع ولتاژ یک اینورتر ۱۳ سطحی تکفاز طراحی شده است، در شکل ۱ می‌بینید. منابع ولتاژ برای اینورتر طراحی شده در این کار با توجه به رابطه (۱) انتخاب می‌شوند.

$$v_1 = 2v_2 = 4v_3 \quad (1)$$

با تغییر ولتاژ منابع با توجه به رابطه (۱) و تغییر ضریب مدولاسیون می‌توان ولتاژ موثر دلخواه را در خروجی اینورتر ایجاد کرد. در این کار $v_1=100v$, $v_2=50$, $v_3=25v$ می‌باشد.

در این مقاله از مدولاسیون چند سطحی PWM برای تولید موج کلید زنی جهت سوئیچینگ استفاده شده است که در بخش ۳ به توضیح آن پرداخته می‌شود.



شکل ۱- اینورتر ۱۳ سطحی با ۸ سوئیچ و سه منبع ولتاژ

۳- تولید موج کریر با مدولاسیون عرض پالس چند سطحی

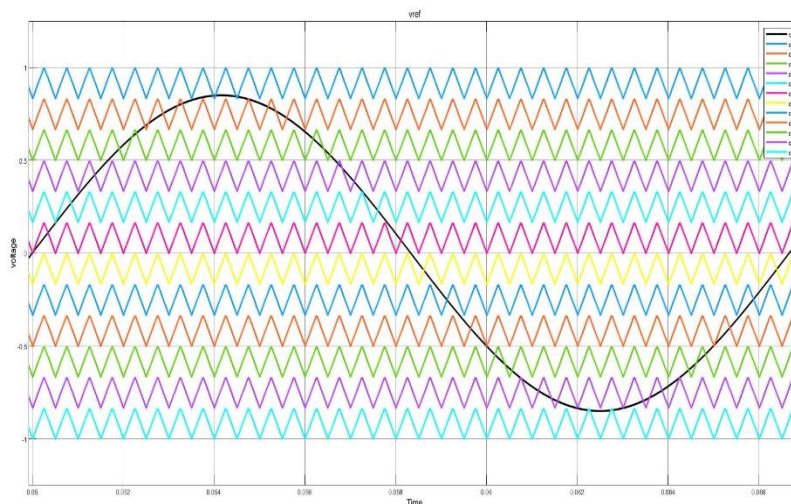
در این مقاله برای تولید پالس سویچینگ کلیدها از مدولاسیون چند سطحی استفاده شده است. با رجوع به رابطه ی (۲) تعداد کریر ها با توجه به تعداد سطح های اینورتر بدست می آید.

$$N=L-1 \quad (2)$$

در این رابطه n تعداد کریرهای لازم و L تعداد سطح ولتاژ خروجی اینورتر می باشد. در این کار $L=13$ و $n=12$ می باشد. موج کریر یک موج مثلثی انتخاب می شود که با توجه به رابطه (۳) دامنه آن مشخص می شود.

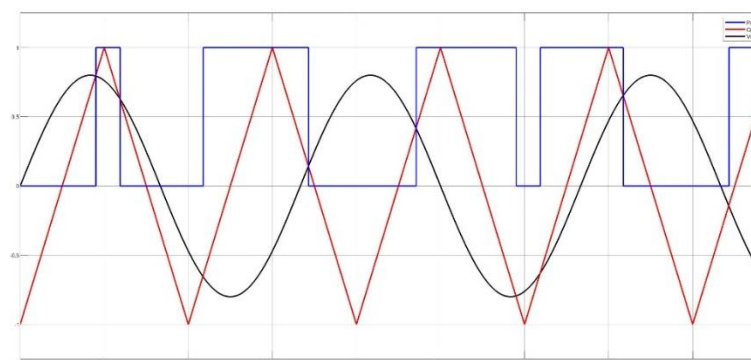
$$a_{cr}=2/n \quad (3)$$

در رابطه (۳) دامنه موج و n تعداد سطح می باشد. در این کار $a_{cr}=1/6$ می شود که این دوازده موج بین ۱ تا -۱ تقسیم می شوند. سیگنال مرجع یک موج سینوسی با فرکانس f_r و دامنه m_r بین ۱- تا ۱ در نظر گرفته می شود که با تغییر دامنه ولتاژ مرجع دامنه ی ولتاژ خروجی اینورتر تغییر می کند. با مقایسه موج مرجع و موج های کریر پالس های سویچینگ تولید می شود. در این کار فرکانس موج مرجع $f_r=60\text{Hz}$ و دامنه ی آن (ضریب مدولاسیون) $m_r=0.8v$ و فرکانس کریرها $f_{cr}=2000\text{Hz}$ می باشد. شکل ۲ را ببینید.



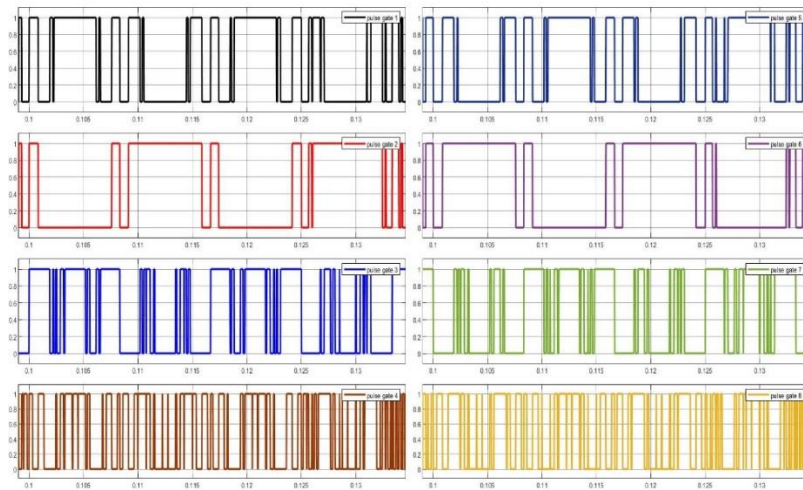
شکل ۲- نمایش موج کریر چند سطحی و موج مرجع

با مقایسه موج مرجع با موج های کریر پالس های سویچینگ برای ۸ کلید ایجاد می شود. اگر موج مرجع از موج کریر کمتر باشد منطق ۱ و اگر بیشتر باشد منطق صفر می شود. موج مرجع یک موج سینوسی با فرکانس مطلوب خروجی می باشد، موج کریر یک موج مثلثی در نظر گرفته می شود. در شکل ۳ نحوه تولید پالس برای سویچ ها و مقایسه ی موج مرجع با موج کریر نشان داده شده است.



شکل ۳ - مقایسه موج مرجع با موج کریر و تولید پالس سویچینگ.

در شکل ۴ پالس های اعمالی به سویچ ها نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می کنید فرکانس سویچینگ سویچ ها متفاوت هست.



شکل ۴- پالس‌های اعمالی به ۸ کلید.

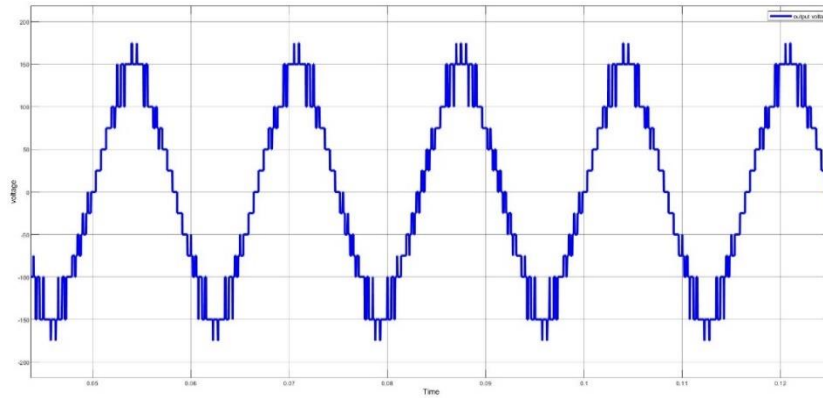
نحوه ترتیب سویچینگ و نحوه ایجاد سطوح ولتاژ در خروجی به جدول ۱ رجوع کنید. به طور مثال زمانی که سویچ‌های ۳ و ۸ زده شود در خروجی مجموع ولتاژهای v_1, v_2, v_3 ایجاد می‌شود و به همین صورت برای حالت دیگر به این ترتیب ۱۳ سطح ولتاژ در خروجی ایجاد می‌گردد.

جدول ۱- ترتیب سویچینگ جهت ایجاد ولتاژ خروجی اینورتر.

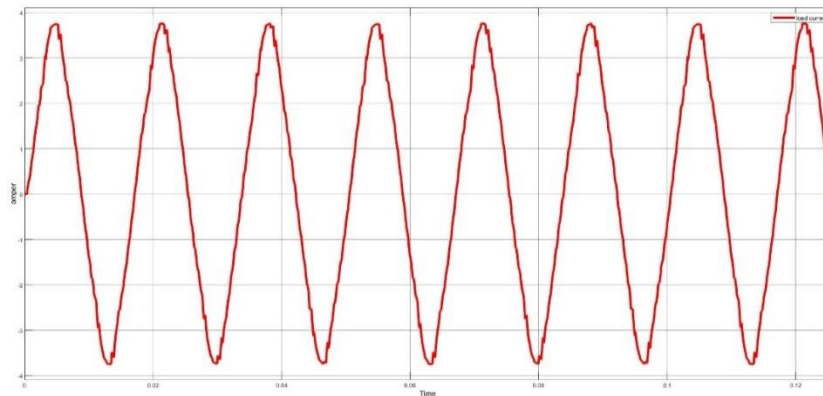
	Sw1	Sw2	Sw3	Sw4	Sw5	Sw6	Sw7	Sw8	vout
1	1	0	1	0	0	1	0	1	$v_1+v_2+v_3$
2	1	0	1	1	0	1	0	0	v_1+v_2
3	1	0	0	0	0	1	1	1	v_1
4	0	0	1	0	1	1	0	1	v_2+v_3
5	0	0	1	1	1	1	0	0	v_2
6	1	1	1	0	0	0	0	1	v_3
7	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1	1	1	1	
8	0	0	0	1	1	1	1	0	$-v_3$
9	1	1	0	0	0	0	1	1	$-v_2$
10	1	1	0	1	0	0	1	0	$-v_2-v_3$
11	0	1	1	1	1	0	0	0	$-v_1$
12	0	1	0	0	1	0	1	1	$-v_1-v_2$
13	0	1	0	1	1	0	1	0	$-v_1-v_2-v_3$

۴- نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با اینورتر CH_B

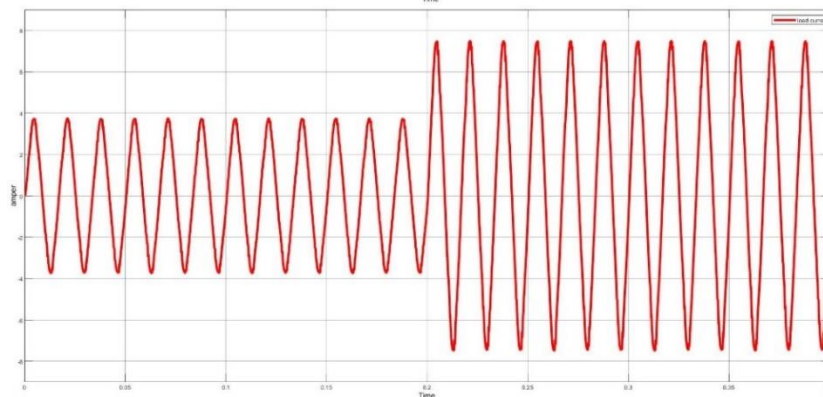
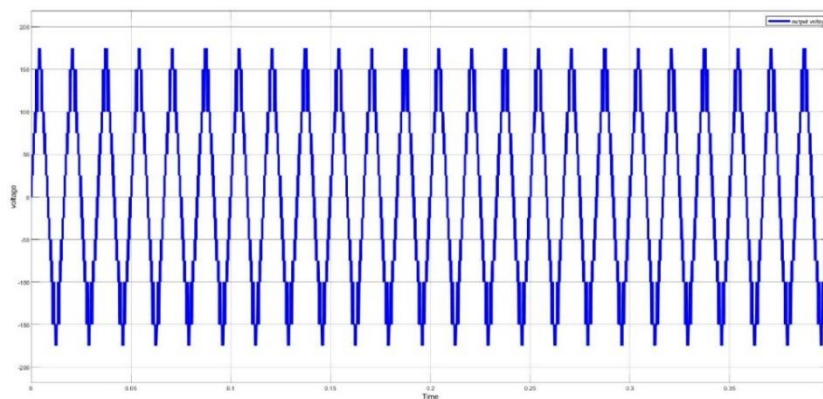
شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب انجام و بار اهمی ۵۰ اهم و بار سلفی ۲۰ میلی‌هائری در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ ولتاژ و در شکل ۵ جریان خروجی اینورتر طراحی شده در این مقاله نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌کنید ولتاژ خروجی دارای ۱۳ سطح می‌باشد که به شکل موج سینوسی بسیار نزدیک هست و همچنین یک بار سلفی کوچک ۲۰ میلی‌هائری جریان خروجی مشابه موج سینوسی می‌باشد و دارای هارمونیک بسیار پایین و نیازی به اضافه کردن فیلتر در خروجی نیست. در شکل ۶ به ازای ۵۰ درصد کاهش بار شکل موج ولتاژ و جریان بار خروجی اینورتر طراحی شده نمایش داده شده است. شکل موج آبی رنگ مربوط به ولتاژ خروجی و شکل موج قرمز رنگ مربوط به جریان بار خروجی می‌باشد. همانطور که نشان داده شده است ولتاژ خروجی به ازای ۵۰ درصد کاهش بار پایدار و ولتاژ خروجی در اثر کاهش ۵۰ درصدی بار ثابت می‌باشد.



شکل ۴- ولتاژ خروجی اینورتر ۱۳ سطحی طراحی شده در این مقاله.

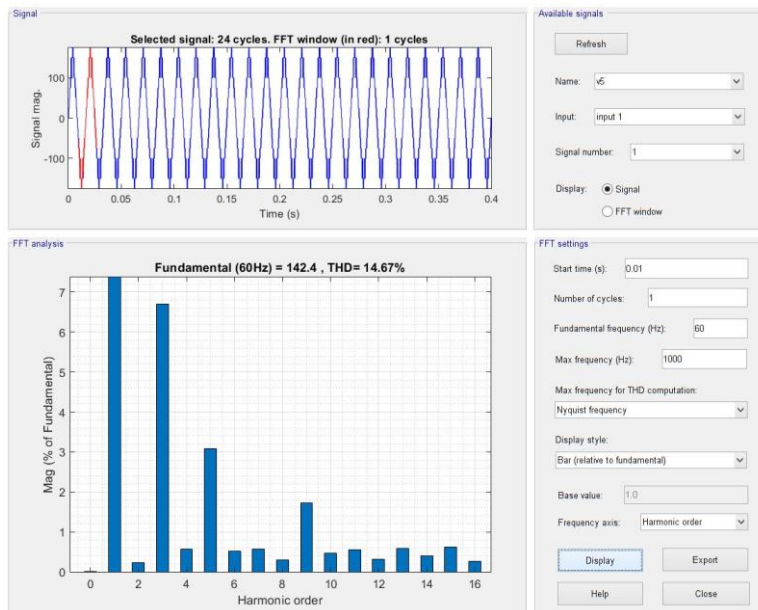


شکل ۵- جریان بار اینورتر ۱۳ سطحی طراحی شده در این مقاله.

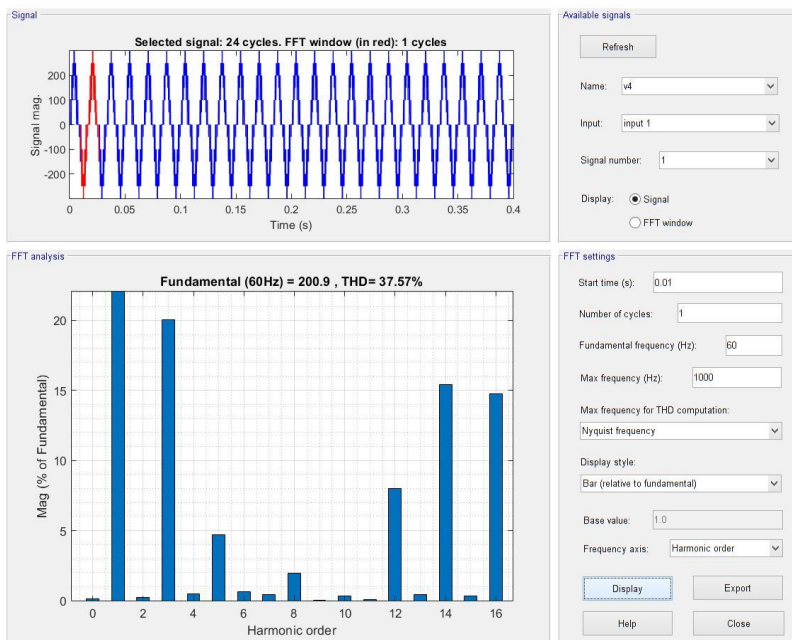


شکل ۶- شکل موج ولتاژ و جریان بار خروجی اینورتر طراحی شده در این مقاله به ازای ۵۰ درصد کاهش بار.

یکی از پارامترهای مهم در طراحی اینورتر اعوجاج هارمونیک کلی THD می‌باشد. در شکل ۷، THD ولتاژ اینورتر ۱۳ سطحی طراحی شده و در شکل ۸، THD ولتاژ اینورتر ۱۳ سطحی CH-B نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید اینورتر طراحی شده دارای THD ولتاژ کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد که تقریباً ۵۰ درصد نسبت به اینورتر CH-B بهبود داشته است.

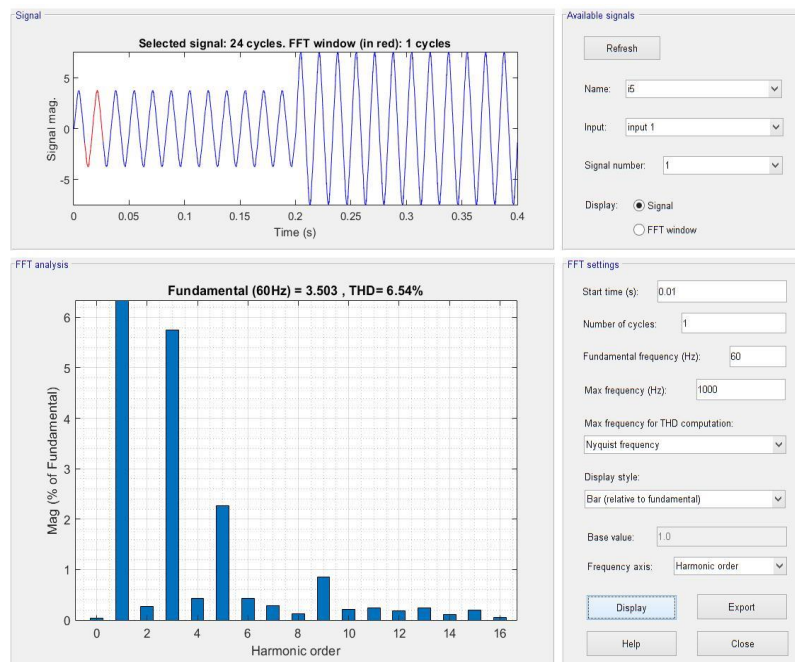


شکل ۷- آنالیز fft اینورتر ۱۳ سطحی طراحی شده برای ولتاژ خروجی.



شکل ۸- آنالیز fft اینورتر ۱۳ سطحی CH-B برای ولتاژ خروجی.

در شکل ۹ آنالیز fft برای بدست آوردن THD جریان اینورتر ۱۳ سطحی طراحی شده در این مقاله آمده است که کمتر از ۷ درصد می‌باشد.



شکل ۹- آنالیز fft اینورتر ۱۳ سطحی طراحی شده برای جریان بار خروجی.

در جدول ۲ مقایسه ای بین اینورتر ۱۳ سطحی ارائه شده در این مقاله و اینورتر CH-B نشان داده شده است.

جدول ۲- مقایسه پارامترهای بین اینورتر ارائه شده و CH-B.

اینورتر CH-B	اینورتر ارائه شده	
۲۴	۸	تعداد کلید ها
۱۲	۱۲	تعداد کریر ها
۳۷,۵۷	۱۴,۶۷	THD برای ولتاژ
۱۶,۷۴	۶,۵۴	THD برای جریان

۵- نتیجه گیری

در این کار نشان داده شد که اینورتر طراحی شده با ۸ کلید نسبت به اینورتر CH-B دارای THD بهتر و کلیدهای کمتری می باشد که کاهش هزینه در ساخت اینورتر را به همراه دارد. همچنین یک طرح جدید برای اینورتر ۱۳ سطحی نمایش داده شده است.

منابع

1. P. W. Hammond.(1997) *A New Approach to Enhance Power Quality for Medium Voltage AC Drives*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 1, pp. 202–208.
2. W. A. Hill and C. D. Harbourt.(1999). *Performance of Medium Voltage Multilevel Inverters*, IEEE Industry Applications Society (IAS) Conference, Vol. 2, pp. 1186–1192.
3. R. H. Osman.(1999). *A Medium Voltage Drive Utilizing Series-Cell Multilevel Topology for Outstanding Power Quality*, IEEE Industry Applications Society (IAS) Conference, pp. 2662–2669.
4. N. Mohan, T. M. Undeland, et al.(2003). *Power Electronics—Converters*, Applications and Design, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York.
5. P. W. Wheeler, L. Empringham, et al.(2000), *Improved Output Waveform Quality for Multilevel H-Bridge Chain Converters Using Unequal Cell Voltages*, IEEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, pp. 536–540.

6. M. D. Manjrekar, P.K. Steimer, et al.(2000), *Hybrid Multilevel Power Conversion System: A Competitive Solution for High Power Applications*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 3, pp. 834–841.
7. G. Carrara, S. Gardella, et al. (1992), *A New Multilevel PWM Method: A Theoretical Analysis*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, No. 3, pp. 497–505.
8. L. M. Tolbert, F. Z. Peng, et al.(1999). *Multilevel Converters for Large Electric Drives*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 1, pp. 36–44.
9. R. Kieferndorf, G. Venkataramanan, et al.(2000). *A Power Electronic Transformer (PET) Fed Nine-Level H-Bridge Inverter for Large Induction Motor Drives*, IEEE Industry Applications Society (IAS) Conference, Vol. 4, pp. 2489–2495.
10. J. Chiasson, L Tolbert, et al.(2002) *Eliminating Harmonics in a Multilevel Converter Using Resultant Theory*, IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 503–508.