یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

بررسی تـأثیر اندیس مدولاسیون بر رفتار مبدل خازن شناور سه سطحی و پنج سطحی

زهرا مرادی شهربابک(نویسنده مسئول)[۱]، حسین پور شاه آبادی [۲]

[۱] دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان Z.moradi@Sirjantech.ac.ir

[۲] دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان hosseinpourshahabadi@gmail.com

چکیده

امروزه اینورترهای چند سطحی در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می گیرند که پرکاربردترین اینورترهای چندسطحی عبارتند از ایتورتر چندسطحی آبشاری، اینورتر چندسطحی کلمپ و اینورتر چندسطحی خازن شناور. به منظور بهبود کیفیت ولتاژ خروجی این نوع اینورترها لازم است علاوه بر اینکه روش کلیدزنی مناسبی انتخاب می‌شود، اندیس مدولاسیون مناسبی نیز انتخاب گردد. به منظور بررسی تاثیر اندیس مدولاسیون بر کیفیت توان اینورترهای خازن شناور، در این مقاله دو مبدل سه سطحی و پنج سطحی با استفاده از روش کلیدزنی مدولاسیون شیفت فاز در نرم افزار PSIM و به ازای مقادیر مختلف اندیس مدولاسیون شبیه سازی شدند. نتایج شبیه سازی حوزه زمان نشان دادند که در هر دو مبدل سه سطحی و پنج سطحی با افزایش اندیس مدولاسیون شکل موج ولتاژ خروجی به فرم سینوسی نزدیکتر می شود. همچنین به منظور ارزیابی نتایج حوزه زمان، رفتار این دو مبدل در حوزه فرکانس نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل هارمونیکی نیز این نتیجه را تایید کرد که افزایش اندیس مدولاسیون باعث کاهش هارمونیکهای ولتاژ می گردد، بطوری که با افزایش اندیس مدولاسیون مقدار THD ولتاژ کمتر شد. همچنین با مقایسه نتایج شبیه سازی مبدل سه سطحی و پنج سطحی مشخص شد که به ازای تمام مقادیر اندیس مدولاسیون، کیفیت ولتاژ خروجی مبدل ۵ سطحی نسبت به مبدل سه سطحی بهتر می باشد.

واژه‌های کلیدی

اینورتر خازن شناور، مدولاسیون شیفت فاز، اندیس مدولاسیون، مبدل چندسطحی.

۱. مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی های منابع تجدید پذیر، به تدریج ظرفیت نصب شده آنها در شبکه قدرت نیز افزایش می یابد. سیستمهای فتوولتایی یکی از مرسوم ترین و پرکاربردترین انواع منابع تجدید پذیر می باشند که قابلیت تولید ولتاژ dc و توان dc را دارند. به منظور اتصال این سیستمهای فتوولتایی، به شبکه قدرت لازم است از تجهیزاتی استفاده نمود که به کمک آنها بتوان توان تولیدی نیروگاه فتوولتایی، را به شبکه قدرت تزریق نمود. یکی از این تجهیزات اینورترها می باشند که ولتاژ dc را به ولتاژac تبدیل می کنند. اینورترها انواع مختلفی دارند، که از لحاظ ساختار، تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت، و روشهای کلیدزنی با یکدیگر متفاوت می باشند. یکی از انواع اینورترها، که معمولاً برای سطوح متوسط و بالای ولتاژ مورد استفاده قرار می گیرند، اینورترهای چند سطحی می باشند[۱].

اینورترهای چند سطحی به سه دسته کلی تقسیم می شوند، اینورترهای چند سطحی آبشاری، اینورترهای چندسطحی کلمپ دیودی و اینورترهای چند سطحی خازن شناور. اینورترهای آبشاری از تعدادی ماژول پل تشکیل شدند که هر ماژول به یک منبع تغذیه مجزایی متصل است. با اتصال چندین ماژول به صورت سری، می توان به سطح ولتاژ مطلوب دست یافت. ایراد اصلی این ساختار استفاده از چندین منبع تغذیه dc مستقل است[۲]. اینورترهای چندسطحی کلمپ، از چندین دیود برشگر و یک منبع تغذیه dc تشکیل شدند. مزیت اصلی این ساختار کاهش استرس بر روی کلیدهای الکترونیک قدرت، و همچنین بهبود کیفیت ولتاژ خروجی است. ایراد اصلی این اینورتر، حفظ تعادل ولتاژ بین خازنها است که با افزایش تعداد سطوح ولتاژ این فرایند سخت تر و پیچیده تر می گردد. از این رو از ساختار کلمپ دیودی در مبدلهای بیش از سه سطحی استفاده نمی شود [۳]. مبدلهای خازن شناور از لحاظ ساختار مشابه مبدلهای کلمپ دیودی می باشند با این تفاوت که خازنهای برشگر جایگزین دیودهای برشگر شدند. در این نوع مبدلها به دلیل شارژ و دشارژ شدن خازنها، مشکل حفظ تعادل ولتاژ خازنها، بطور ذاتی برطرف گردیده از این رو نسبت به دو مبدل قبلی در صنایع کاربرد بیشتری دارد[۴-۵].

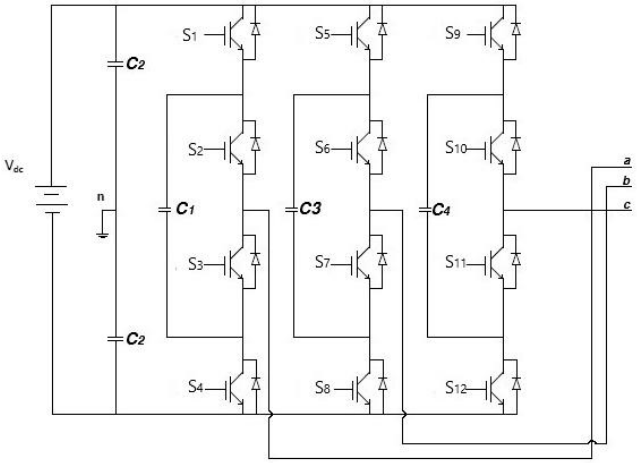
کیفیت ولتاژ خروجی در مبدلهای خازن شناور وابسته به نوع روش کلیدزنی می باشد. مرسوم ترین روشهای کلیدزنی عبارتند از، مدولاسیون تکی عرض پالس، مدولاسیون چندتایی عرض پالس،مدولاسیون سینوسی عرض پالس، مدولاسیون سینوسی تصحیح شده عرض پالس و مدولاسیون سینوسی شیفت فاز. در این مقاله روش مدولاسیون شیفت فاز بطور مفصل شرح داده می شود و سپس تاثیر اندیس مدولاسیون بر کیفیت ولتاژ خروجی مبدلهای خازن شناور سه سطحی و پنج سطحی بررسی می شود.

۲. مبدل خازن شناور سه سطحی

در شکل ۱ ساختار مبدل خازن شناور سه سطحی سه فاز نمایش داده شده است. مطابق این شکل، این اینورتر، در هر فاز از ۴ سوئیچ و یک خازن برشگر تشکیل شده است و دو خازن اصلی نیز به لینک dc متصل شدند که ولتاژ هر یک از خازنهای اصلی برابر با Vdc/2 می باشد. در این مبدل، سوئیچهای روی هر ساق بصورت مکمل می باشند و وضعیت روش و خاموش شدن آنها عکس یکدیگر می باشند به-عنوان مثال جفت سوئیچهای ساق A شامل (S1,S4) (S2,S3) می باشند و زمانی که سوئیچهای S2, S1 هدایت میکنند ، سوئیچهای s3 و s4 خاموش می باشند. در این شرایط ولتاژ فاز a (Van) برابر با Vdc/2 می باشد. بسته به وضعیت سوئیچهای S1، S2، S3 و S4 ولتاژ هر فاز بین سه مقدار Vdc/2+، Vdc/2- وصفر ولت تغییر می کند. در جدول ۱ حالات مختلف کلیدزنی مبدل سه سطحی و ولتاژ خروجی متناظر با هر حالت نشان داده شده است. همان طور که این جدول نشان می دهد، برای ایجاد سطح ولتاژ صفر دوحالت تکراری امکان پذیر میباشد که در واقع از همین حالتهای تکراری کلیدزنی برای حفظ تعادل ولتاژ خازنها استفاده می‌شود.

جدول ۱ حالت های مختلف کلید زنی فاز a مبدل سه سطحی

S4	S3	S2	S1	ولتاژخروجی V_{an}
0	1	0	1	0
1	0	1	0	0
0	0	1	1	Vdc/2
1	1	0	0	-Vdc/2

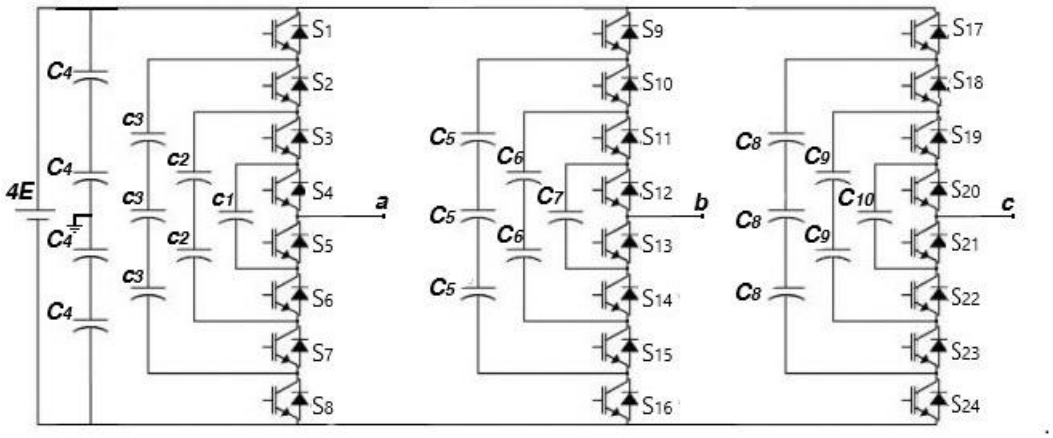


شکل ۱. ساختار مبدل خازن شناور سه سطحی سه فاز

۳. مبدل خازن شناور پنج سطحی

در شکل ۲ ساختار مبدل خازن شناور پنج سطحی سه فاز نمایش داده شده است. مطابق این شکل، این اینورتر، در هر فاز از ۸ سوئیچ و ۶ خازن برشگر تشکیل شده است و چهار خازن اصلی نیز به لینک dc متصل شدند که اختلاف ولتاژ بین این خازنهای لینک dc برابر با Vdc/4 می باشد. در این مبدل نیز، سوئیچهای قسمت بالایی و پایینی هر ساق بصورت مکمل می باشند و وضعیت روش و خاموش شدن آنها عکس یکدیگر می باشند. برای مثال ، جفت سوئیچهای ساق A شامل (S4,S5) (S3,S6) (S2,S7) (S1,S8) می باشند.بنابراین تنها چهار حامل مثلثی برای هر فاز اینورتر مورد نیاز است. بسته به وضعیت سوئیچهای S1، S2، ... ,تا S8 ولتاژ هر فاز بین مقادیر Vdc/2+، -Vdc/2 ، +Vdc/4، -Vdc/4وصفر ولت تغییر می کند.

در جدول ۲ حالات مختلف کلیدزنی مبدل پنج سطحی و ولتاژ خروجی متناظر با هر حالت نشان داده شده است. بر اساس این جدول، برای تولید ولتاژ صفر ولت ۶ حالت تکراری وجود دارد و برای تولید هر یک از ولتاژ های Vdc/4 و Vdc4- نیز ۴حالت تکراری وجود دارد.



شکل ۲. ساختار مبدل خازن شناور پنج سطحی سه فاز

جدول ۲- حالت های مختلف کلید زنی فاز a مبدل سه سطحی

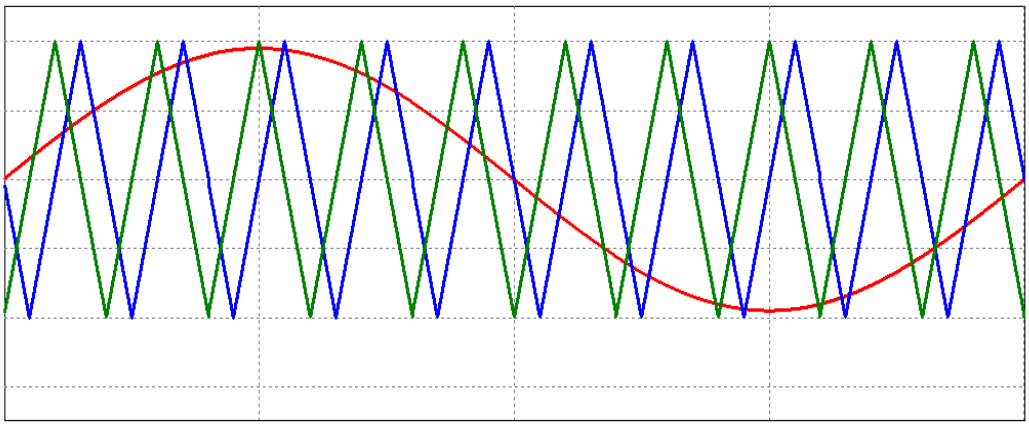
S8	S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	Van
۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	Vdc/2
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	Vdc/4
۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	
۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	0
۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	
۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	
۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	
۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	
۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	
۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	_Vdc/4
۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	
۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	
۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	
۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	-Vdc/2

۳. روش مدولاسیون شیفت فاز

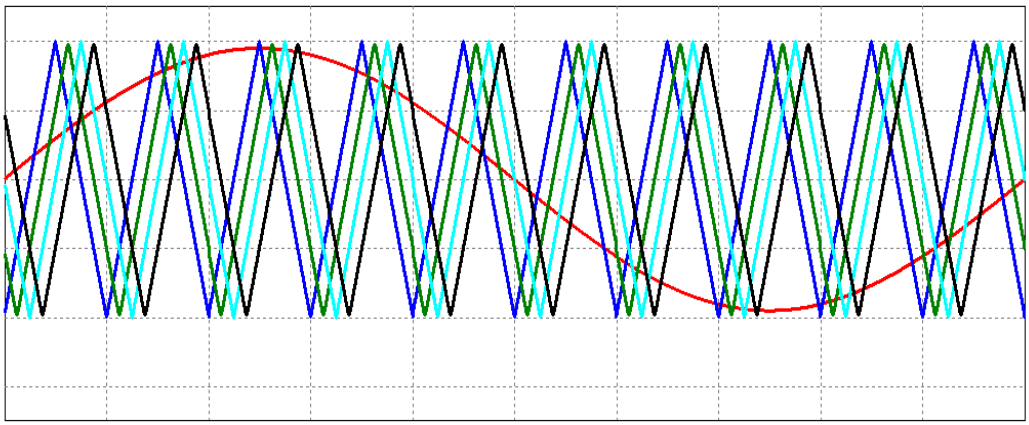
در روش مدولاسیو شیفت فاز، با مقایسه یک سیگنال مرجع و سیگنال حامل، وضعیت روشن و خاموش شدن سوئیچها روشن می شود. سیگنال مرجع دارای شکل سینوسی می باشد و در سیستمهای سه فاز اختلاف فاز ۱۲۰ درجه بین سیگنال مرجع فازهای مختلف وجود دارد. همچنین در یک مبدل N سطحی، تعداد موجهای حامل برابر با (N-1)/2 می باشد [۶]. درکلیدهای قسمت بالایی هر ساق ، سیگنال حامل و سیگنال مرجع با یکدیگر مقایسه می شوند و برای کلید مکمل آن در قسمت پایینی هر ساق، همان سیگنال حامل، با منفی سیکنال مرجع مقایسه می شوند. در این روش کلیدزنی ، موجهای حامل از لحاظ فرکانس و دامنه با یکدیگر یکسان می باشند، اما اختلاف فاز بین موجهای حامل برابر است با:

$$\theta_C = \frac{\pi}{(N-1)}, \qquad (۱)$$

به عنوان مثال در مبدل سه سطحی اختلاف فاز بین موجهای حامل برابر با ۹۰ درجه و در مبدل پنج سطحی اختلاف زاویه برابر با ۴۵ درجه می باشد. شکل ۳ شکل موج مربوط به سیگنال مرجع و حامل را نشان می دهد.



الف- سه سطحی



ب) پنج سطحی

شکل ۳- سیگنال حامل و مرجع در مبدل سه سطحی و پنج سطحی

۴. بررسی تاثیر اندیس مدولاسیون بر رفتار مبدل خازن شناور

در روش مدولاسیون شیفت فاز لازم است مقدار بیشینه سیگنال مرجع (A_m) نسبت به مقدار بیشینه سیگنال حامل (A_c) کمتر باشد از این رو شاخصی به نام اندیس مدولاسیون تعریف می گردد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$m_a = \frac{A_m}{A_c} \qquad (۲)$$

با تغییر ma شکل موج ولتاژ خروجی تغییر می کند، از این رو لازم است در طراحی اینورترهای خازن شناور، مقدار ma را به‌گونه ای انتخاب نمود که کیفیت ولتاژ خروجی در حد قابل قبولی باشد. به منظور تعیین بهترین اندیس مدولاسیون، در این مقاله تاثیر اندیس مدولاسیون بر کیفیت ولتاژ خروجی بررسی می شود. برای این منظور دو اینورتر سه سطحی و پنج سطحی را با استفاده از نرم افزار PSIM شبیه سازی نموده و رفتار این مبدلها ارزیابی می گردد. در این شبیه سازی از یک منبع ولتاژ dc ۴۰۰ ولت استفاده شده است.

اندازه هریک از خازنهای برشگر برابر با ۱۰۰ میکروفاراد و اندازه خازنهای متصل به لینک dc برابر با ۲ میکروفاراد است. در این شبیه سازی فرکانس سیگنال حامل برابر با ۵۰۰ هرتز و فرکانس سیگنال مرجع برابر با ۵۰ هرتز می باشد و اندیس مدولاسیون را از ۰ تا ۱ تغییر می دهیم.

در شکل ۴، شکل موج ولتاژ خروجی مبدل ۳ سطحی خازن شناور به ازای سه مقدار مختلف ma نمایش داده شده است. بر اساس این شکل با افزایش اندیس مدولاسیون کیفیت ولتاژ خروجی بهبود می یابد .به ازای اندیس مدولاسیون برابر با 0.2 و 0.4 ولتاژ خروجی بصورت سه سطحی است اما با افزایش ma تعدا سطوح ولتاژ تغییر پیدا کرد. همچنین در شکل ۵، شکل موج ولتاژ خروجی مبدل پنج سطحی خازن شناور به ازای چهار مقدار مختلف ma نمایش داده شده است. بر اساس این شکل با افزایش اندیس مدولاسیون کیفیت ولتاژ خروجی بهبود می یابد و شکل موج خروجی به سینوسی نزدیکتر می شود.

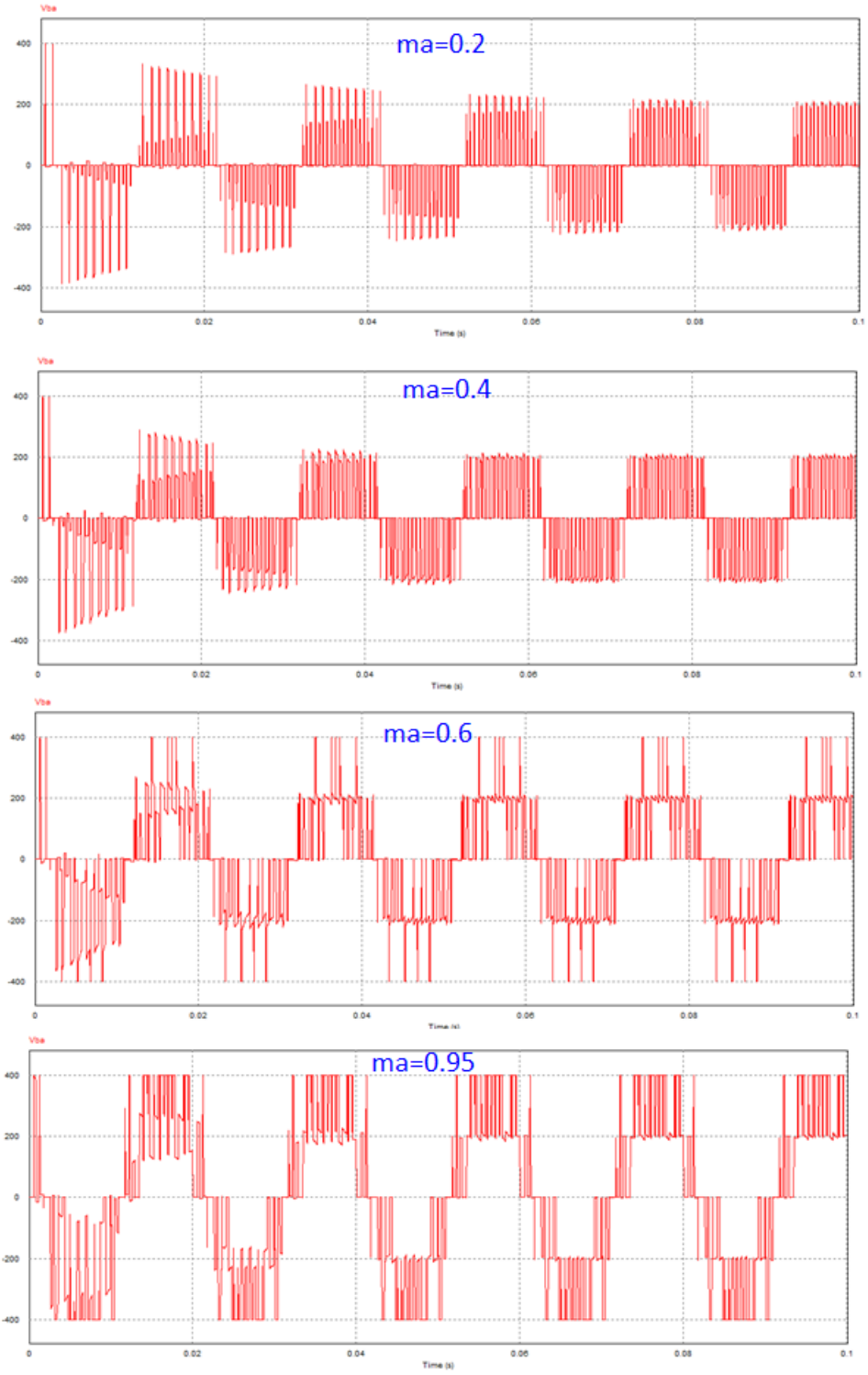
در جدول۳، هارمونیک ولتاژ به ازای ضرایب مختلف ma نشان داده شده است بر اساس این جدول با افزایش ضریب اندیس مدولاسیون مقدار THD ولتاژ خط افزایش می باد همچنین این جدول نشان می دهد کیفیت ولتاژ مبدل پنج سطحی نسبت به مبدل سه سطحی بهتر است و هارمونیک کمتری دارد.

جدول ۳- هارمونیک ولتاژ به ازای ضرایب مختلف ma

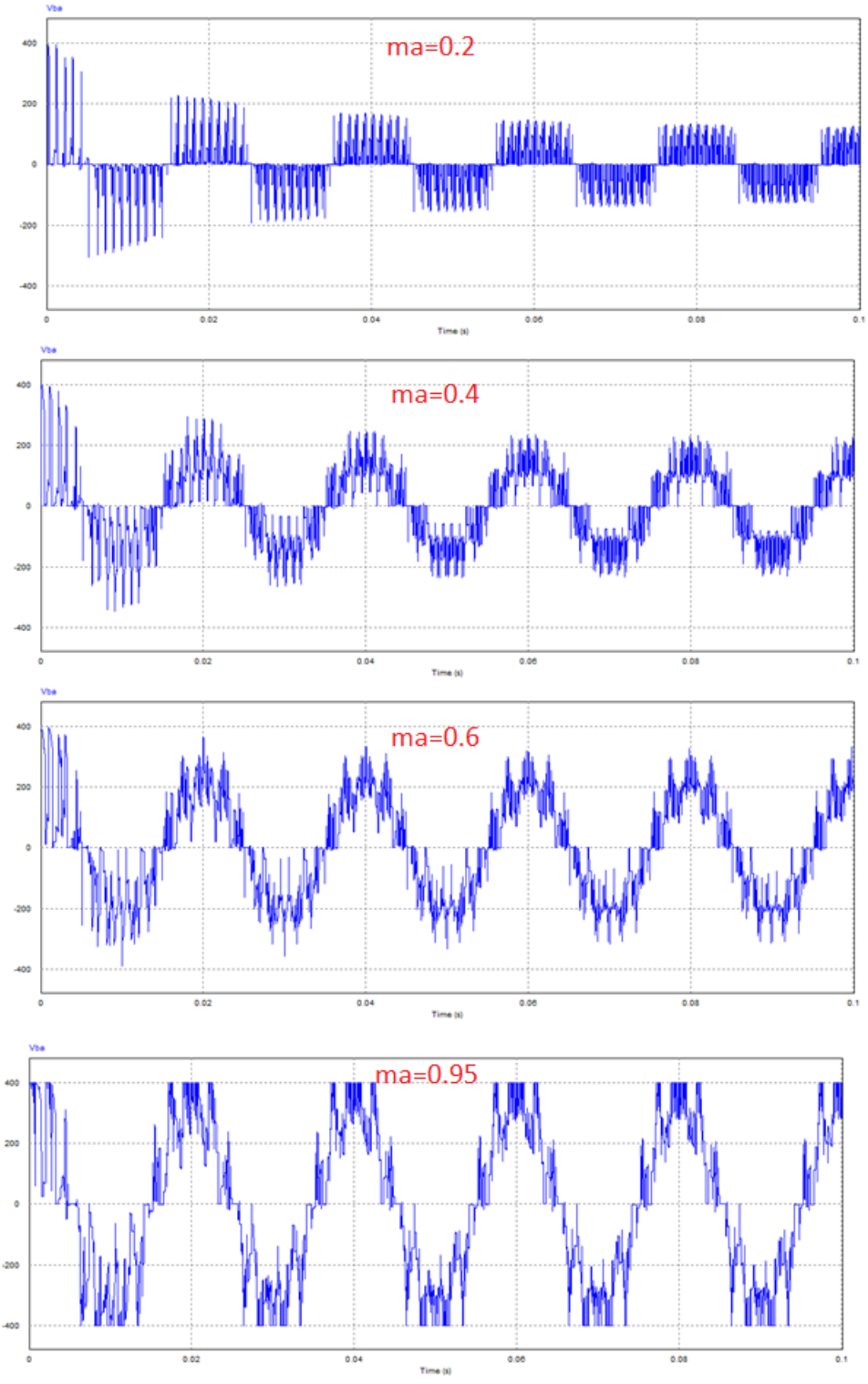
	Ma=0	Ma=0.1	Ma=0.2	Ma=0.4	Ma=0.6	Ma=0.8	Ma=0.9	Ma=0.99
سه سطحی	8.52	2.44	0.2.24	1.22	0.769	0.65	0.601	0.561
پنج سطحی	6.59	2.085	1.711	0.926	0.610	0.505	0.476	0.401

۵. نتیجه گیری

در این مقاله اثر اندیس مدولاسیون بر عملکرد مبدل خازن شناور سه سطحی و پنج سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد با افزایش اندیس مدولاسیون شکل موج ولتاژ خروجی به سینوسی نزدیکتر می شود. همچنین نتایج تحلیل هارمونیکی نیز این نتیجه را تایید کرد، بطوری که با افزایش ma مقدار THD ولتاژ کمتر شد. همچنین با مقایسه نتایج شبیه سازی مبدل سه سطحی و پنج سطحی مشخص شد که به ازای تمام مقادیر اندیس مدولاسیون، کیفیت ولتاژ خروجی مبدل ۵ سطحی نسبت به مبدل سه سطحی بهتر می باشد.



شکل ۴- شکل موج ولتاژ خط به خط (Vba) مبدل سه سطحی به ازای مقادیر مختلف ma



شکل ۵- شکل موج ولتاژ خط به خط (Vba) مبدل پنج سطحی به ازای مقادیر مختلف ma

منابع

[1] T. A. Meynard, H. Foch, P. Thomas, J. Courault, R. Jakob, and M. Nahrstaedt, "Multicell converters: basic concepts and industry applications,"IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, pp. 955–964, Oct. 2002.

[2] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," IEEE J. Emerg. and Sel. Topics Power Electron., vol. 1, no. 3, pp. 139–152, Sep. 2013.

[3] J. Pou, J. Zaragoza, P. Rodriguez, S. Ceballos, V.M. Sala, R.P. Burgos, and D. Boroyevich, "Fast-processing modulation strategy for the neutral-point-clamped converter with total elimination of low-frequency voltage oscillations in the neutral point,"IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 4, pp. 2288–2294, Aug. 2007.

[4] J. Huang and K. A. Corzine, "Extended operation of flying capacitor multilevel inverters,"IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 1, pp. 140–147, Jan. 2006.

[5] C. D. Townsend, T. J. Summers, J. Vodden, A. J. Watson, R. E. Betz, and J. C. Clare, "Optimization of switching losses and capacitor voltage ripple using model predictive control of a cascaded H-bridge multilevel statcom,"IEEE Trans. Power Electron., vol.28, no. 7, pp. 3077–3087, Jul. 2013.

[6] Darus, R., Konstantinou, G., Pou, J., Ceballos, S., & Agelidis, V. G. (2014, May). Comparison of phase-shifted and level-shifted PWM in the modular multilevel converter. In 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE ASIA) (pp. 3764-3770). IEEE.

.