

دو روش کلیدزنی جدید به منظور کنترل سرعت موتور القایی در اینورتر یازده سطحی دیود-کلمپ

محمدصادق عرفی یگانه، نوید غفارزاده و محمد سروی

استفاده از این روش‌ها می‌توان الگوریتم‌هایی برای حذف حسگرها در خروجی موتور ارائه کرد که موجب کاهش هزینه موتور می‌گردد [۶] تا [۸]. در مراجع متعددی به بررسی نتایج خروجی موتور القایی با به کارگیری فیلتر در خروجی پرداخته شده و همچنین روش‌هایی برای کنترل مشخصه‌های ماشین همانند کاهش هارمونیک در ولتاژ ورودی (ولتاژ استاتور)، ضریب توان و کنترل سرعت معرفی گردیده است [۹].

از جمله مزایای اینورترهای چندسطحی می‌توان به استرس ولتاژ کمتر بر روی کلیدهای قدرت و کاهش هارمونیک‌ها در ولتاژ و جریان خروجی اشاره کرد. اینورترهای چندسطحی از نظر ساختار به دو دسته عمده تقسیم‌بندی می‌شوند: اینورترهای چندسطحی با ساختار کلاسیک و اینورترهای چندسطحی با ساختار مدرن. اینورترها با ساختار کلاسیک به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: اینورتر چندسطحی دیود-کلمپ، اینورتر چندسطحی خازن شناور و اینورتر چندسطحی آبخاری [۱۰] تا [۱۳].

فرکانس کلیدزنی در دو فرکانس پایه و فرکانس بالا بهره‌برداری می‌شود. روش کلیدزنی حالت فرکانس پایه به دو روش کنترل فضای بردار و روش حذف هارمونیک انتخابی تقسیم‌بندی می‌گردند. روش فرکانس در کلیدزنی بالا به دو روش کلیدزنی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی و روش کلیدزنی مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی تقسیم‌بندی می‌گردند [۱۴]. یکی از روش‌های متداول در کلیدزنی اینورترهای چندسطحی روش کلیدزنی پهنای پالس مدولاسیون چندحامله است. هرچه تعداد سطوح ولتاژ خروجی در اینورترهای چندسطحی افزایش یابد شکل موج ولتاژ خروجی به شکل موج دلخواه سینوسی نزدیک‌تر می‌شود و بنابراین مشخصه‌های ولتاژ خروجی بدون استفاده از فیلترهای پرحجم و پرهزینه بهبود می‌یابند [۱۵] تا [۱۷].

در راه‌اندازی موتورهای القایی سه‌فاز معمولاً از ساختارهایی استفاده می‌گردد که با منابع کمتری راه‌اندازی شوند. در میان ساختارهای گوناگون در اینورترهای چندسطحی ساختار دیود-کلمپ به دلیل نیاز به تنها یک منبع ورودی از جمله ساختارهای پرکاربرد در راه‌اندازی محسوب می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به دست آمده از اینورترهای هفت، نه و یازده سطحی نشان می‌دهد که اینورتر یازده سطحی به دلیل داشتن مشخصه خروجی ولتاژ بهتر نسبت به سایر سطوح، زمان کمتری را برای رسیدن به حالت پایدار خود در مشخصه‌های سرعت-زمان و گشتاور-زمان نسبت به اینورترهای هفت و نه سطحی می‌گذراند [۱۸] تا [۲۰].

به طور عمده برای ارزیابی قابلیت اطمینان در مبدل‌ها دو روش وجود دارد. در روش تخمینی ابتدا مقدار خطا با استفاده از ضریب خطا در هر دوره برای هر قطعه (کلید قدرت، دیود، خازن و ...) محاسبه می‌گردد و سپس با جمع این خطاها می‌توان قابلیت اطمینان در یک مبدل را به دست آورد. در روش دقیق مقدار قابلیت اطمینان را خیلی دقیق‌تر به دست می‌آورد و با استفاده از اطلاعات قطعات که در مراجع گوناگونی وجود دارد، می‌تواند قابلیت اطمینان یک مبدل را به دست آورد. از جمله اطلاعات

چکیده: با بهره‌گیری از روش‌های کلیدزنی رایج در صنعت، این مقاله دو روش کلیدزنی جدید چندحامله (بر مبنای موج حامل) را برای بهبود مشخصه‌های ولتاژ خروجی در یک اینورتر یازده سطحی دیود-کلمپ ارائه داده است. هارمونیک‌های زوج و مؤلفه DC در روش‌های پیشنهادی COOD و VFBCOD، با اعمال شیفت فازی در موج حامل، حذف گردیده‌اند و در نتیجه مقدار اعوجاج هارمونیک کل و ریبیل گشتاور کاهش یافته است. با استفاده از دو روش پیشنهادی، تعداد متوسط کلیدزنی‌ها در یک دوره تناوب به طور برابر بین کلیدها توزیع می‌گردد و طول عمر کلیدها افزایش می‌یابد. در این مقاله یک اینورتر پل کامل به هر فاز اینورتر یازده سطحی دیود-کلمپ برای ایجاد تغییر در پلاریته ولتاژ سری گردیده است تا بتوان الگوهای کلیدزنی بیشتری را برای تولید سطوح معین ولتاژ به کار گرفت. سپس با تعیین صحیح الگوی کلیدزنی‌ها می‌توان اینورتر را در صورت خرابی کلیدها با الگوی کلیدزنی جایگزینی راه‌اندازی کرد و قابلیت اطمینان را افزایش داد.

کلیدواژه: اعوجاج هارمونیک کل، اینورتر چندسطحی، بر مبنای موج حامل، پهنای پالس مدولاسیون چندحامله.

۱- مقدمه

موتورهای القایی با توجه به مزایایی از جمله طراحی ساده و مستحکم، قابلیت اطمینان بالا، قیمت ارزان، هزینه نگهداری پایین، بازده بالا و اتصال آسان به یک منبع در صنعت کاربرد فراوان دارند [۱]. تا کنون مدل‌های فراوانی از پنجره‌های گوناگونی همچون متغیر قرار دادن پارامترهای اندازه در موتور القایی برای نشان‌دادن رفتار یک موتور القایی سه‌فاز معرفی شده‌اند [۲].

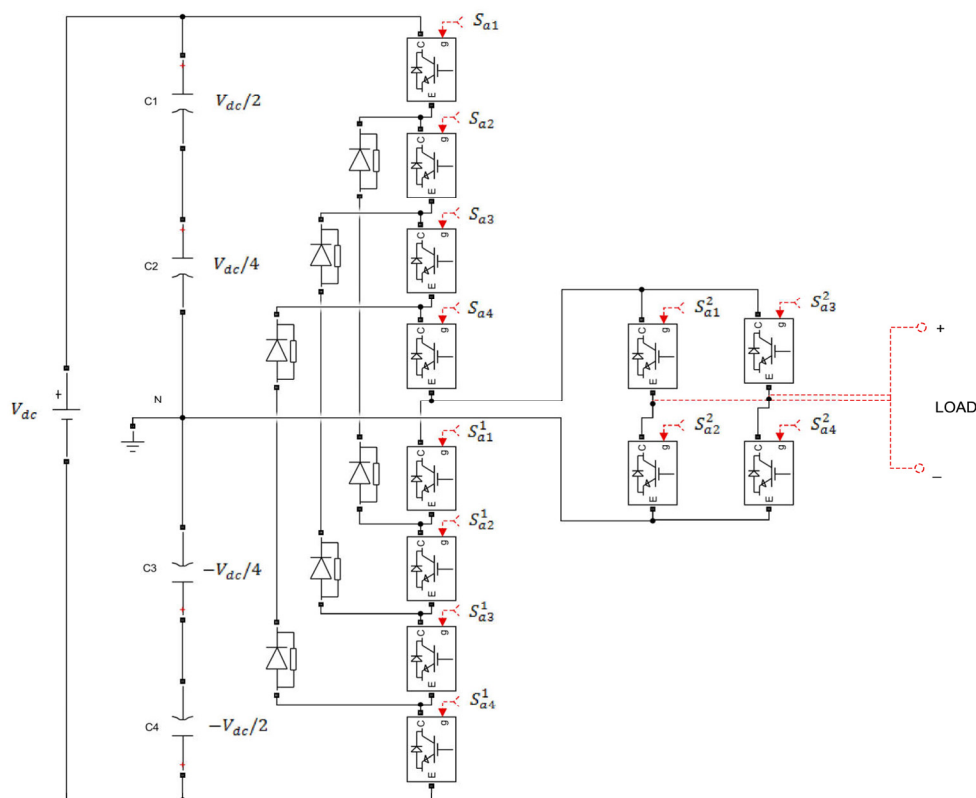
به طور کلی روش‌های کنترل سرعت در موتورهای القایی به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: کنترل برداری و کنترل اسکالر که هر کدام از این روش‌ها را می‌توان به صورت کنترل حلقه باز و یا کنترل حلقه بسته پیاده‌سازی کرد [۳] تا [۵]. روش کنترل اسکالر خود به دو شاخه کنترل V/f و کنترل گشتاور تقسیم‌بندی می‌گردد. در روش کنترل V/f دو متغیر می‌تواند به صورت جداگانه مقدار داده شوند تا سرعت و گشتاور موتور را کنترل کنند. از جمله مزایای این روش می‌توان به ساختار ساده، هزینه کم، طراحی ساده، خطاهای کم در حالت ماندگار و مهم‌ترین ویژگی آن وابسته‌نبودن این پارامترها به نحوه پیاده‌سازی موتور اشاره کرد. با

این مقاله در تاریخ ۲۰ فروردین ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۴ مهر ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

محمدصادق عرفی یگانه، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، (email: m.s.o.yegane@edu.ikiu.ac.ir).

نوید غفارزاده، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، (email: ghaffarzadeh@eng.ikiu.ac.ir).

محمد سروی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، (email: sarvi@eng.ikiu.ac.ir).



شکل ۱: اینورتر پنج سطحی دیود-کلمپ به همراه اینورتر تمام پل سری شده.

جدول ۱: وضعیت‌های گوناگون کلیدها در اینورتر پنج سطحی دیود-کلمپ.

وضعیت کلیدها								ولتاژ V_{an}
S_{a1}^1	S_{a2}^1	S_{a3}^1	S_{a4}^1	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}	
۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	$V_s = V_{dc}/2$
۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	$V_r = V_{dc}/4$
۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	$V_r = 0$
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	$V_r = -V_{dc}/4$
۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	$V_r = -V_{dc}/2$
۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	

این قطعات می‌توان به شاخص‌های دما، توان، ولتاژ و ... اشاره کرد [۲۱] و [۲۲].

در این مقاله مشخصه‌های ولتاژ خروجی با استفاده از دو روش کلیدزنی پیشنهادی چندحامله در یک اینورتر یازده سطحی دیود-کلمپ بهبود داده شده است. سرعت و گشتاور در موتورهای القایی با ولتاژ استاتور رابطه مستقیم دارند و بنابراین با بهبود مشخصه‌های ولتاژ خروجی می‌توان مشخصه‌های موتور القایی را نیز بهبود بخشید. در این مقاله به هر فاز اینورتر دیود-کلمپ، یک اینورتر پل کامل برای تغییر پلاریته سری گردیده است تا بتوان این سطوح ولتاژ را با الگوهای کلیدزنی بیشتری تولید نمود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار MATLAB R2016b انجام گرفته است.

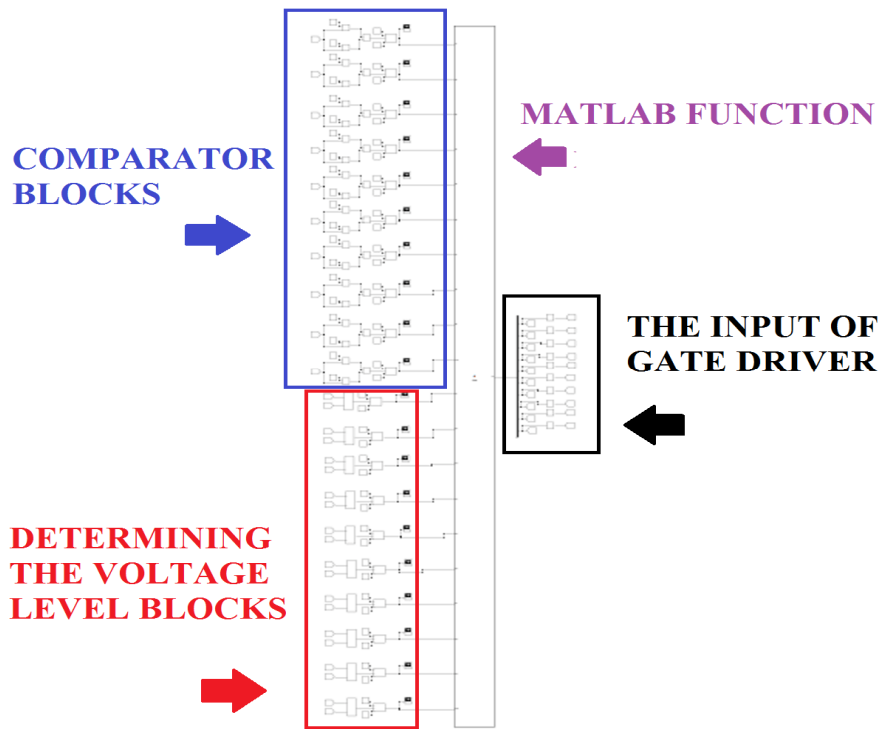
۲- توزیع برابر کلیدزنی

اینورتر چندسطحی دیود-کلمپ به عنوان اینورتر منبع ولتاژ استفاده می‌گردد و در کاربردهایی همچون راه‌اندازهای موتور AC (موتورهای القایی)، منابع تغذیه بدون وقفه، سلول‌های خورشیدی و جبران‌کننده‌های استاتیک توان راکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از ویژگی‌های مهم

این ساختار داشتن تنها یک منبع DC است که موجب تسهیل در استفاده از این اینورترها گردیده است.

یکی از ویژگی‌های مهم در اینورترهای چندسطحی، وجود الگوهای متعدد کلیدزنی برای تولید یک سطح ولتاژ معین در خروجی اینورتر است که موجب افزایش قابلیت اطمینان کلیدها و افزایش طول عمر کلیدها می‌گردد. بنابراین اگر در حین عملکرد سیستم، اختلال و خرابی در بعضی از کلیدهای قدرت رخ دهد، با تغییر الگوی کلیدزنی می‌توان بدون متوقف کردن این فرایند، تغذیه بار را با یک الگوی کلیدزنی جدید ادامه داد و کلید معیوب را از مدار خارج کرد. همچنین می‌توان با استفاده از این الگوهای مختلف کلیدزنی، تعداد پالس‌هایی را که در یک دوره تناوب به یک کلید داده می‌شود مدیریت کرد. در جدول ۱ وضعیت گوناگون کلیدها برای تولید سطوح مختلف ولتاژ در یک اینورتر پنج سطحی دیود-کلمپ نشان داده شده است. همان طور که در جدول ۱ مشخص است تنها برای تولید سطح ولتاژ صفر می‌توان از دو الگوی گوناگون استفاده کرد و سایر سطوح تنها با یک الگوی کلیدزنی عمل می‌کنند. برای مثال می‌توان با استفاده از دو الگو سطح ولتاژ صفر تولید نمود. در الگوی اول با روشن کردن کلیدهای $S_{a1}^1, S_{a2}^1, S_{a3}^1, S_{a4}^1$ و خاموش کردن کلیدهای $S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}$ و خاموش کردن کلیدهای $S_{a1}^1, S_{a2}^1, S_{a3}^1, S_{a4}^1$ و $S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}$ را می‌توان با خاموش کردن کلیدهای $S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}$ و روشن کردن کلیدهای $S_{a1}^1, S_{a2}^1, S_{a3}^1, S_{a4}^1$ نیز انجام داد.

یکی از روش‌ها جهت افزایش قابلیت اطمینان در اینورترهای چندسطحی، اضافه نمودن میدل‌ها به صورت سری است. در این روش، قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد اما باید توجه داشت که با اضافه شدن این قطعات هزینه ساخت میدل بالا می‌رود. در مصارف خاص که عملکرد پیوسته و قابلیت اطمینان بالای سیستم مورد نیاز است، هزینه‌های این روش را می‌توان به راحتی توجیه نمود. شکل ۱ نشان می‌دهد که یک اینورتر پل کامل با هر شاخه از اینورتر دیود-کلمپ در هر فاز سری



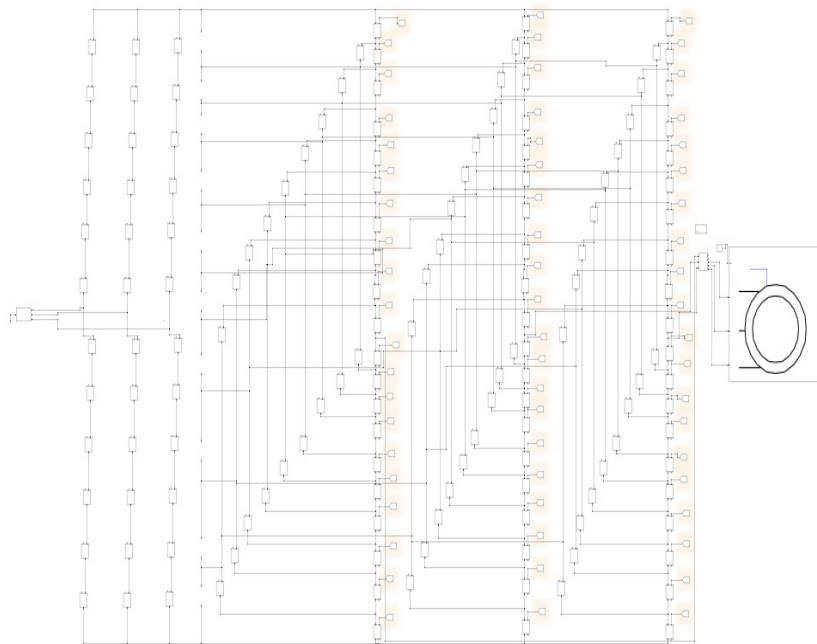
شکل ۲: بلاک‌های کنترل برای یک فاز از اینورتر یازده سطحی دیود-کلمپ در محیط شبیه‌سازی متلب.

جدول ۲: وضعیت‌های گوناگون کلیدها در اینورتر پنج سطحی دیود-کلمپ سری شده با یک اینورتر پل کامل در هر فاز.

وضعیت کلیدها												ولتاژ V_{an}
S_{af}^r	S_{ar}^r	S_{ar}^n	S_{a1}^r	S_{af}^1	S_{ar}^1	S_{ar}^n	S_{a1}^1	S_{ar}^1	S_{ar}^n	S_{a1}^n	S_{ar}^n	V_{an}
۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	$V_s = V_{dc}/2$
۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	$V_s = V_{dc}/4$
۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	$V_s = 0$
۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	$V_s = -V_{dc}/4$
۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	$V_s = -V_{dc}/2$
۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	$V_s = -V_{dc}/4$
۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	$V_s = V_{dc}/2$
۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	$V_s = V_{dc}/4$

شده است. باید در نظر گرفت که در محاسبات قابلیت اطمینانی که در بحث‌های الکترونیک قدرت صورت می‌گیرد، اگر از روش تخمینی استفاده گردد، افزایش تعداد کلیدها موجب کاهش قابلیت اطمینان می‌گردد. در اینورترهای چندسطحی با افزایش تعداد سطوح، تعداد قطعات نیز افزایش می‌یابد. اگر این محاسبات زمانی که یک کلید از مدار حذف می‌شود و دو سر آن مدار باز می‌گردد بررسی شود، کاملاً مشهود است که با توجه به ویژگی تعریف الگوهای متعدد کلیدزنی برای اینورتر چندسطحی می‌توان قابلیت اطمینان، عملکرد پیوسته سیستم و طول عمر این کلیدها را افزایش داد [۲۲]. بنابراین به صورت تقریبی با استفاده از روش تخمینی در محاسبه قابلیت اطمینان برای این اینورتر پنج سطحی می‌توان نتیجه گرفت که در ساختار دیود-کلمپ تعداد کلیدها ۸ عدد و در ساختار پیشنهادی تعداد کلیدها ۱۲ عدد است. یعنی قابلیت اطمینان ۳۳٪ کاهش می‌یابد اما از طرفی برای تولید هر سطح از ولتاژ یک روش جایگزین موجود است که موجب می‌شود قابلیت اطمینان ۵۰٪ افزایش یابد. نهایتاً

قابلیت اطمینان حدود ۱۷٪ افزایش می‌یابد. برای یک اینورتر یازده سطحی ۲۰ عدد کلید موجود است و بنابراین با اضافه کردن مبدل تمام‌پل قابلیت اطمینان ۱۶٪ کاهش می‌یابد، اما از طرفی با استفاده از خاصیت الگوی کلیدزنی متعدد می‌توان قابلیت اطمینان را ۵۰٪ افزایش داد. نهایتاً برای یک اینورتر یازده سطحی قابلیت اطمینان در حدود ۳۴٪ افزایش می‌یابد. این محاسبات تقریبی هستند و می‌توان مقدار دقیق آنها را با روش دقیق [۲۱]، با در نظر گرفتن نقش سایر المان‌ها محاسبه نمود. هرچه تعداد سطوح بالاتر رود، توجیه اقتصادی این روش نیز قابل فهم‌تر است. با سری کردن یک مبدل تمام‌پل می‌توان جدول ۱ را بهبود داد و نتیجه این کار را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد. برای مثال اگر هر کدام از کلیدهای S_{af}^r ، S_{ar}^r ، S_{ar}^n ، S_{a1}^r ، S_{af}^1 ، S_{ar}^1 ، S_{ar}^n ، S_{a1}^1 که ولتاژ $V_{dc}/2$ را تولید می‌نمایند دچار مشکل شوند به راحتی می‌توان از الگوی جایگزینی که از کلیدهای S_{af}^1 ، S_{ar}^1 ، S_{ar}^n ، S_{a1}^1 ، S_{af}^r ، S_{ar}^r ، S_{ar}^n ، S_{a1}^r استفاده می‌کند بهره گرفت. در شکل ۲ مجموع بلاک‌های کنترلی برای ارسال دستور فرمان به



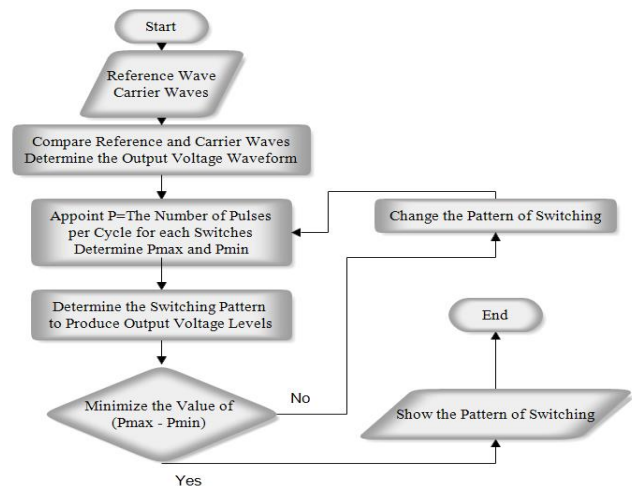
شکل ۳: نمای کلی از ساختار اینورتر یازده سطحی و موتور القایی سه فاز.

شده است. در ابتدای این فرایند موج‌های مرجع و حامل با یکدیگر مقایسه می‌گردند و سپس شکل موج ولتاژ خروجی فاز به دست می‌آید. با مشاهده این شکل موج می‌توان تعیین کرد که هر کلید به چه تعداد دفعاتی در هر دوره تناوب باید روشن و خاموش گردد تا سطوح ولتاژ مورد نظر تولید شوند. پس از تعیین الگوهای کلیدزنی برای تولید هر سطح ولتاژ، تعداد دفعاتی که هر کلید در یک دوره تناوب روشن و خاموش می‌شوند شمارش می‌گردد. سپس با استفاده از الگوهای جایگزین کلیدزنی که با سری شدن یک مبدل تمام پل به دست آمدند، می‌توان بیشترین تعداد دفعات کلیدزنی را به حداقل این دفعات نزدیک کرد. با نزدیک شدن این مقادیر به یکدیگر می‌توان طول عمر کلیدها را افزایش داد.

۳- روش کنترل سرعت در موتور القایی

اینورترهای چندسطحی می‌توانند ولتاژ خروجی AC مطلوبی را در خروجی خود تولید نمایند و مقدار دامنه و فرکانس این ولتاژ را می‌توان به راحتی با استفاده از روش‌های گوناگون کلیدزنی کنترل نمود. در روش کنترلی V/f با ایجاد تغییرات در دو پارامتر ولتاژ و فرکانس می‌توان سرعت موتور القایی را در نرخ‌های گوناگونی کنترل نمود. در اینورترهای چندسطحی که با روش کلیدزنی پهنای پالس مدولاسیون سینوسی چندحامله کلیدزنی می‌شوند با تغییر در فرکانس موج مرجع (موج سینوسی)، می‌توان فرکانس خروجی را کنترل نمود. همچنین با افزایش و کاهش فرکانس موج حامل (فرکانس کلیدزنی) و یا با استفاده از لینک یکسوساز، می‌توان مقدار ولتاژ را تغییر داد. شکل ۵ نمایی از سیستم کنترل سرعت موتور القایی را نشان می‌دهد. در شکل ۵ یک منبع تغذیه سه فاز AC (برای نمونه شبکه برق سه فاز) وجود دارد. این ولتاژ AC توسط یک یکسوکننده به ولتاژ DC تبدیل می‌شود. سپس این ولتاژ توسط چند خازن متعادل‌کننده، نرم می‌گردد تا آماده ورود به اینورتر گردد. در مبدل DC/AC، کلیدهای قدرت توسط روش کلیدزنی چندحامله پهنای مدولاسیون پالس سینوسی روشن و خاموش می‌شوند. سپس اینورتر چندسطحی می‌تواند بار (موتور القایی) را تغذیه و کنترل نماید.

در بسیاری از کاربردهای صنعتی، موتورهای القایی با سرعت ثابت استفاده می‌شوند. همچنین کاربر در خیلی از این کاربردها قصد دارد که با

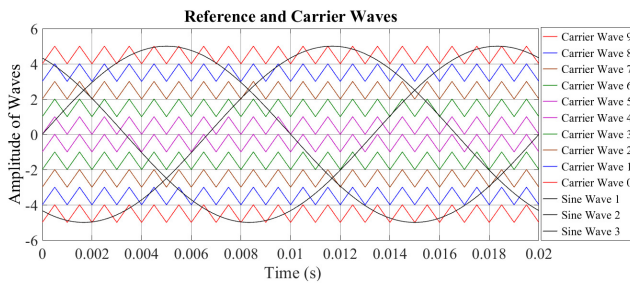


شکل ۴: روندنمای انتخاب الگوی کلیدزنی برای توزیع مناسب کلیدزنی.

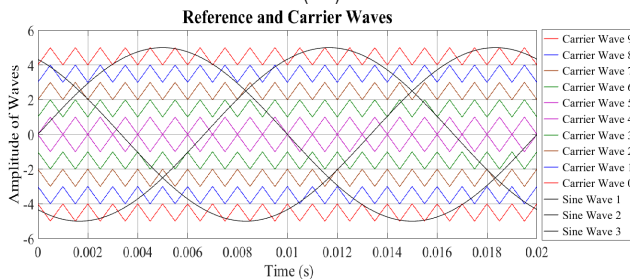
کلیدهای قدرت در اینورتر سه فاز یازده سطحی دیود-کلمپ آمده است. از سه متلب فانکشن جهت ایجاد دستور آتش مناسب برای کلیدها در سه فاز استفاده گردیده است. در هر یک از این متلب فانکشن‌ها، الگوی کلیدزنی برای تولید هر یک از سطوح ولتاژ در خروجی ارائه گردیده است. هر کدام از این الگوها با توجه به سایر الگوهای کلیدزنی دیگر، به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده‌اند که تقریباً تمام کلیدهای موجود در هر فاز با تعداد برابری در یک دوره روشن و خاموش می‌شوند. این ویژگی سبب می‌شود که طول عمر کلیدها افزایش یابد. بدین معنی که تعداد دفعات کلیدزنی در کلیدهایی که تعداد دفعات بیشتری در یک دوره تناوب کلیدزنی می‌شوند، با کلیدهایی که تعداد دفعات کمتری در یک دوره تناوب کلیدزنی می‌شوند تقریباً به یکدیگر نزدیک گردیده‌اند.

در شکل ۳ نمای کلی از منبع تغذیه سه فاز، یکسوکننده سه فاز دیودی (کنترل نشده)، اینورتر سه فاز دیود-کلمپ و یک موتور القایی سه فاز نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی که در محیط متلب انجام گردیده از کلیدهای ماسفت استفاده شده است.

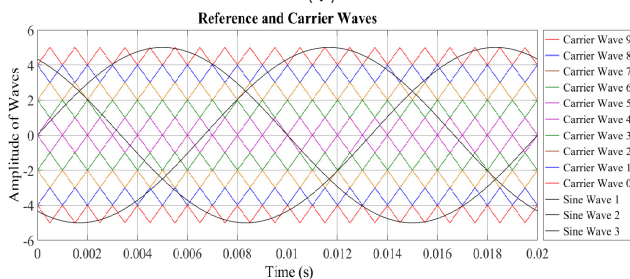
در شکل ۴ فرایند انتخاب الگوی کلیدزنی مناسب برای توزیع مناسب تعداد دفعات کلیدزنی میان کلیدهای یک مبدل چندسطحی نشان داده



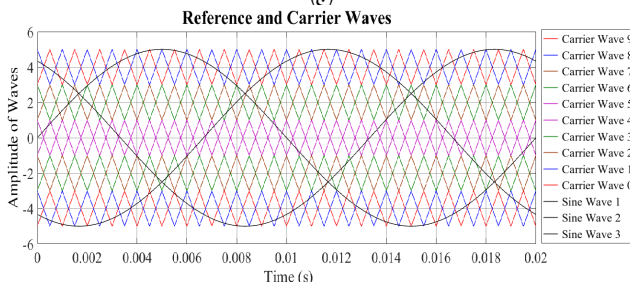
(الف)



(ب)



(ج)



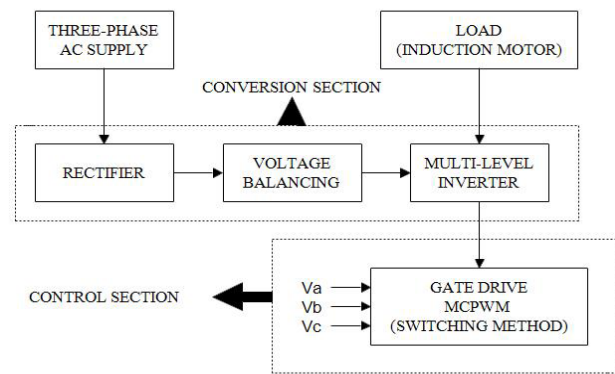
(د)

شکل ۵: شکل موج‌های مرجع و حامل اینورتر یازده سطحی با استفاده از روش‌های کلیدزنی چندحامله، (الف) روش کلیدزنی PD-PWM، (ب) روش کلیدزنی POD-PWM، (ج) روش کلیدزنی APOD-PWM و (د) روش کلیدزنی LPS-PWM.

روش کلیدزنی با تابع نه فرد و نه زوج، روش‌های کلیدزنی POD-PWM و APOD-PWM، روش‌هایی هستند که تابع شکل موج خروجی آنها تابعی فرد است. در این روش‌ها مقدار مؤلفه‌های زوج و مؤلفه DC برابر با صفر است و بنابراین مقدار مؤلفه هارمونیک‌های موجود در خروجی کاهش می‌یابد. در سایر روش‌های نام برده شده، تابع شکل موج خروجی، تابعی نه فرد و نه زوج است. در این روش‌ها علاوه بر مؤلفه‌های هارمونیک فرد، مؤلفه‌های زوج و DC نیز موجود می‌باشند و بنابراین مؤلفه‌های هارمونیک در شکل موج خروجی نسبت به روش‌های قبلی بیشتر است. پس انتظار می‌رود که بعضی از شاخص‌های کیفی ولتاژ خروجی کاهش یابند.

۴-۲ روش‌های پیشنهادی

با توجه به مطالب گفته‌شده در بخش قبلی می‌توان نتیجه گرفت که یکی از راه‌های بهبود مشخصه‌های ولتاژ خروجی، تبدیل شکل موج تابع به یک شکل موج متقارن است. تبدیل شکل موج خروجی به یک شکل



شکل ۵: بلوک دیاگرام سیستم تغذیه و کنترل سرعت موتور القایی.

استفاده از یک پتانسیومتر و به صورت حلقه باز سیستم خود را کنترل نماید و بنابراین روش حلقه باز V/f می‌تواند انتخاب بسیار مناسبی باشد. اگر سرعت موتور القایی ثابت نباشد اما بتوان آن را کنترل نمود می‌توان مانع اتلاف بالغ بر ۶۰٪ انرژی شد [۱۸].

۴-۱ روش‌های کلیدزنی در اینورترهای چندسطحی

در این بخش ابتدا روش‌های کلیدزنی پهنای پالس مدولاسیون چندحامله رایج در صنعت برای اینورترهای چندسطحی بررسی می‌شوند و سپس به تحلیل ویژگی‌های موج حامل در این روش‌ها پرداخته می‌شود، در انتها نیز دو روش کلیدزنی بهبودیافته پیشنهاد می‌گردد.

۴-۱-۱ روش‌های رایج

در روش کلیدزنی فرکانس پایه، تمامی کلیدها در یک اینورتر تنها می‌توانند برای یک بار در طول یک دوره تناوب، خاموش و روشن شوند و بنابراین شکل موج خروجی اینورتر، یک شکل موج پله‌ای است که تنها با یک فرمان آتش در هر سطح از ولتاژ به وجود می‌آید. روش کلیدزنی فرکانس بالا (روش پهنای مدولاسیون پالس) به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود: روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی و روش مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی. بر خلاف روش قبلی، در این روش کلیدها در یک اینورتر می‌توانند به هر تعداد مورد نیاز خاموش و روشن شوند. در این روش، هارمونیک‌های موجود در خروجی به شدت کاهش پیدا می‌کند. روش کلیدزنی پهنای مدولاسیون پالس به طور فزاینده‌ای در مبدل‌های راه‌انداز AC کاربرد دارند.

به روش کلیدزنی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی در اینورترهای چندسطحی، روش کلیدزنی چندحامله می‌گویند. در این روش موج مرجع، با موج حامل در هر سطح مقایسه می‌شود و در این مقایسه اگر مقدار موج مرجع بیشتر از موج حامل بود، به گیت کلیدهای قدرت دستور آتش (بستگی به نوع کلید، مقدار معینی ولتاژ یا جریان جهت بایاس کردن) داده می‌شود. در غیر این صورت، دستور خاموش شدن به کلید داده می‌شود و بنابراین با استفاده از این روش مقایسه‌ای، می‌توان سطوح مختلفی از ولتاژ را در خروجی اینورتر ایجاد نمود. بعضی روش‌های متداول کلیدزنی چندحامله در صنعت برای اینورترهای چندسطحی عبارت است از PD-PWM، POD-PWM، APOD-PWM، CO-PWM، VFCB-PWM و LS-PWM.

در شکل ۶ شکل موج‌های مرجع و حامل برخی از این روش‌ها در فرکانس کلیدزنی برابر با ۱ کیلوهرتز و ضریب مدولاسیون برابر با ۱ نشان داده شده‌اند. روش‌های کلیدزنی چندحامله با توجه به نوع تابع به دست آمده در خروجی به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش کلیدزنی با تابع فرد و

موج‌های حاملی که سطوح زیر صفر را تشکیل می‌دهند و سپس هم‌زمان کردن تمامی آنها، شکل موج تابع خروجی به یک تابع فرد تبدیل گردیده است که مؤلفه‌های زوج و DC به طور کامل حذف گردیدند. برای روشن‌تر شدن موضوع، ابتدا روش‌های پایه که روش‌های پیشنهادی از آنها گرفته شده‌اند معرفی می‌گردند و سپس به شناخت و بررسی روش‌های پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱ روش کلیدزنی CO-PWM

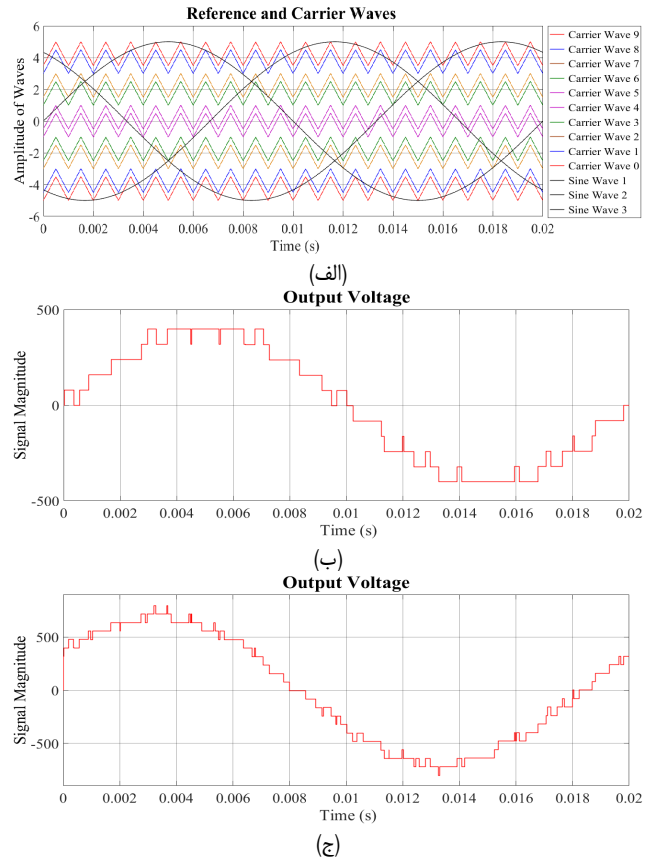
در این روش کلیدزنی تمام موج‌های حامل دارای فرکانس و فاز مشابهی هستند اما دامنه آنها از یک بیشتر است و مطابق شکل به یکدیگر نزدیک‌تر هستند، لذا آنها تقریباً روی هم قرار می‌گیرند. همان طور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود روش کنترل CO-PWM برای یک اینورتر یازده سطحی اعمال شده است. تعداد ده موج حامل با فرکانس ۱ کیلوهرتز و سه موج مرجع سینوسی با فرکانس ۵۰ هرتز برای کنترل خروجی سه فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مقایسه این موج‌ها، جهت تولید پالس‌های فرمان برای خاموش و روشن کردن کلیدهای قدرت استفاده می‌گردد. شکل ۷-ب، شکل موج حاصل از مقایسه یکی از موج‌های مرجع و تمام موج‌های حامل است، پس شکل موج ولتاژ خروجی برای یک‌فاز را نتیجه می‌دهد. شکل موج خروجی حاصل، یک تابع نه فرد و نه زوج است. در این تابع، علاوه بر مؤلفه‌های مرتبه فرد، مؤلفه‌هایی با مرتبه زوج و مؤلفه DC نیز موجود است. شکل ۷-ج شکل موج ولتاژ خطبه‌خط را نمایش می‌دهد.

۴-۲-۲ روش کلیدزنی VFCB-PWM

در این روش کلیدزنی، فرکانس کلیدزنی در هر دو سطح متقارن مشابه یکدیگر است و دامنه تمام موج‌های حامل با یکدیگر برابر هستند. شکل ۸-الف کنترل پهنای مدولاسیون پالس را برای این روش در یک اینورتر یازده سطحی نشان می‌دهد. فرکانس‌های هر دو موج حامل متقارن با یکدیگر برابر است. این فرکانس‌ها با بالا رفتن سطح نیز افزایش می‌یابد و بدین ترتیب فرکانس در سطح اول برابر ۱ کیلوهرتز، در سطح دوم برابر ۲ کیلوهرتز، ... و نهایتاً در سطح پنجم برابر با ۵ کیلوهرتز است. این موج‌ها با یکدیگر مقایسه گردیده و پالس‌های فرمان برای خاموش و روشن کردن کلیدهای قدرت تولید می‌گردند. شکل‌های ۸-ب و ۸-ج به ترتیب شکل موج ولتاژ خروجی برای یک‌فاز و شکل موج ولتاژ خطبه‌خط خروجی را نشان می‌دهند. در این روش نیز مانند روش قبلی شکل موج خروجی حاصل، یک تابع نه فرد و نه زوج است و بنابراین علاوه بر مؤلفه‌های فرد، مؤلفه‌های زوج و مؤلفه DC را نیز شامل می‌شود.

۴-۲-۳ روش کلیدزنی پیشنهادی COOD-PWM

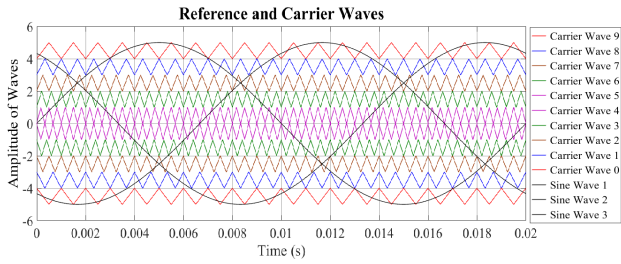
روند عملکرد این روش کلیدزنی همانند روش CO-PWM است. تفاوت این روش بهبود یافته با روش CO-PWM این است که در این روش یکی از دو موج حامل متقارن، به اندازه نصفه دوره تناوب موج حامل، شیفت داده می‌شود و سپس با سایر موج‌های حامل سنکرون می‌گردد. با اعمال کردن این شیفت فازی، می‌توان شکل موج خروجی فاز اینورتر را به شکل تابعی فرد مشاهده نمود. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، روش کنترل پهنای مدولاسیون پالس COOD-PWM برای یک اینورتر یازده سطحی اعمال شده است. شکل ۹-الف شکل موج‌های مرجع و حامل و شکل‌های ۹-ب و ۹-ج به ترتیب شکل موج ولتاژ خروجی برای یک‌فاز و شکل موج خط به خط خروجی را نشان می‌دهند.



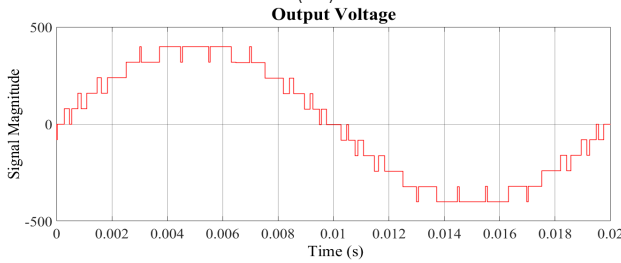
شکل ۷: مشخصه‌های اینورتر یازده سطحی با استفاده از روش کلیدزنی CO-PWM، (الف) شکل موج‌های مرجع و حامل، (ب) شکل موج ولتاژ فاز خروجی و (ج) شکل موج ولتاژ خطبه‌خط خروجی.

موج با تابع فرد، یک روش ساده برای رسیدن به این هدف است. در این مقاله با به کارگیری روش کلیدزنی چندحامله بر مبنای موج حامل، سعی بر تبدیل تابع شکل موج خروجی به یک تابع فرد گردیده است. در این راستا روش‌های کلیدزنی چندحامله پیشنهادی بر مبنای موج حامل $COOD-PWM^1$ و $VFCBOD-PWM^2$ پیشنهاد می‌گردند. تفاوت روش‌های پیشنهادی در این مقاله با [۱۷] در این است که هرچه تعداد سطوح تولیدی در ولتاژ خروجی بالاتر می‌رود، دقت تعریف تابع ولتاژ خروجی به دست آمده از برخورد موج‌های مرجع و حامل با در نظر گرفتن نرخ نمونه برداری ثابت (با افزایش نرخ نمونه برداری، زمان محاسبات به شدت افزایش می‌یابد) از لحاظ نرم‌افزاری کمتر می‌شود و بنابراین به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی دشوار می‌گردد و نتایج صحیحی در خروجی به دست نمی‌آید. از طرفی هرچه تعداد سطوح بالاتر می‌رود شکل موج ولتاژ خروجی به دست آمده به شکل موج سینوسی نزدیک‌تر می‌گردد و با تغییر فرکانس موج حامل، تغییرات بسیار اندکی در خروجی حاصل می‌گردد و بنابراین نیازی به استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیست. همچنین فرکانس موج حامل در [۱۷] به عنوان یک متغیر برای سطوح مختلف در نظر گرفته شده است. این موج حامل می‌تواند با سایر موج‌ها در سطوح دیگر هم‌زمان باشد و یا می‌تواند با موج‌های دیگر هم‌زمان نباشد. اما در این مقاله، فرکانس برای تمام سطوح با یکدیگر برابر است که موجب سادگی در پیاده‌سازی این روش می‌گردد. علاوه بر این در روش‌های پیشنهاد شده در این مقاله با اعمال یک شیفت فازی در

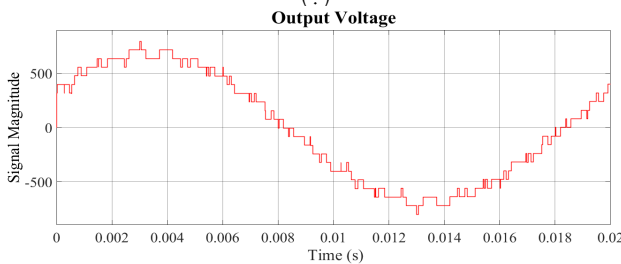
1. Carrier Overlapping Opposition Disposition-PWM
2. Variable Frequency Carrier Band Opposition Disposition-PWM



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰: مشخصه‌های اینورتر یازده‌سطحی با استفاده از روش کلیدزنی VFCB-PWM. (الف) شکل موج‌های مرجع و حامل، (ب) شکل موج ولتاژ فاز خروجی و (ج) شکل موج ولتاژ خطبه‌خط خروجی.

جدول ۳: مشخصه‌های ولتاژ خروجی در اینورتر یازده‌سطحی دیود-کلمپ سری شده با یک اینورتر پل کامل برای روش‌های پیشنهادی کلیدزنی.

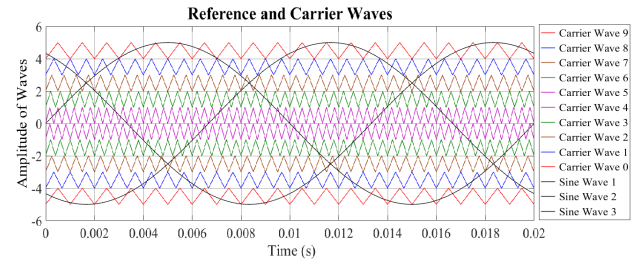
روش کلیدزنی	THD (Phase)	THD (Line-Line)	DF	Vrms (V)
CO	۱۱٫۷۱٪	۷٫۴۳٪	۰٫۱۳۳٪	۴۹۵٫۶
COOD	۱۱٫۶۰٪	۹٫۵۷٪	۰٫۱۲۱٪	۴۹۴٫۷
VFCB	۹٫۹۷٪	۷٫۹۵٪	۰٫۰۸۵٪	۴۹۰٫۴
VFCBOD	۹٫۷۹٪	۷٫۷۲٪	۰٫۰۳۰٪	۴۹۰٫۷

۴-۲-۴ روش کلیدزنی پیشنهادی VFCBOD-PWM

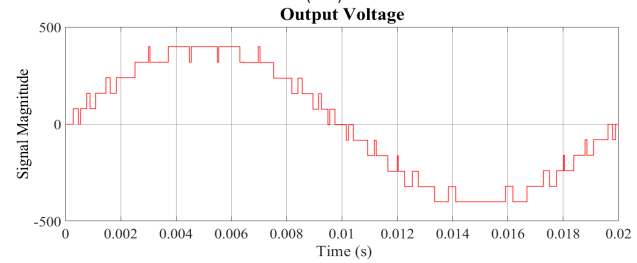
نحوه عملکرد این روش کلیدزنی نیز همانند روش کلیدزنی VFCB-PWM است. در این روش پیشنهادی بر خلاف روش VFCB-PWM، یکی از دو موج حامل متقارن که دارای فرکانس کلیدزنی برابری هستند، به اندازه نصفه دوره تناوب موج حامل، شیفت داده می‌شود و سپس با سایر موج‌های حامل سنکرون می‌گردد، بنابراین شکل موج خروجی فاز اینورتر به صورت تابعی فرد به دست می‌آید. شکل ۱۰ روش کلیدزنی پیشنهادی پهنای مدولاسیون پالس VFCBOD-PWM را برای یک اینورتر با یازده سطح نمایش می‌دهد. شکل ۱۰-الف شکل موج‌های مرجع و حامل و شکل ۱۰-ب و ۱۰-ج به ترتیب شکل موج ولتاژ خروجی برای یک‌فاز و ولتاژ خطبه‌خط خروجی را نشان می‌دهند.

۵- نتایج شبیه‌سازی

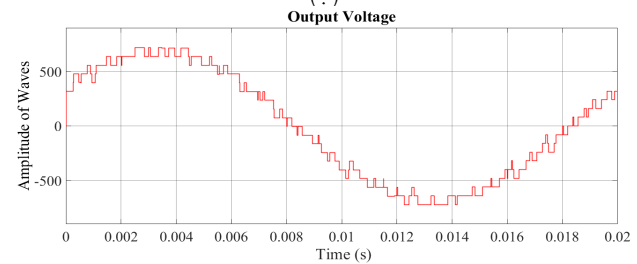
در جدول ۳ ضریب مدولاسیون برابر ۱ (نسبت بیشترین مقدار دامنه موج مرجع به بیشترین مجموع مقادیر موج‌های حامل) و فرکانس کلیدزنی



(الف)

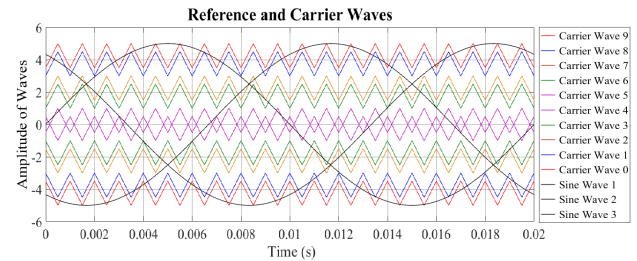


(ب)

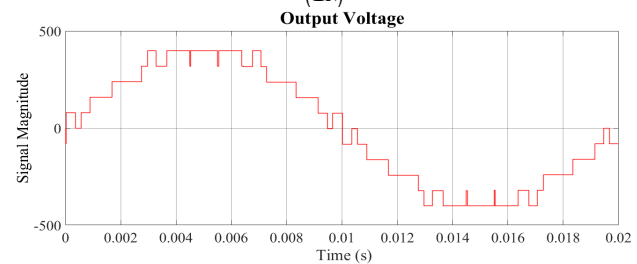


(ج)

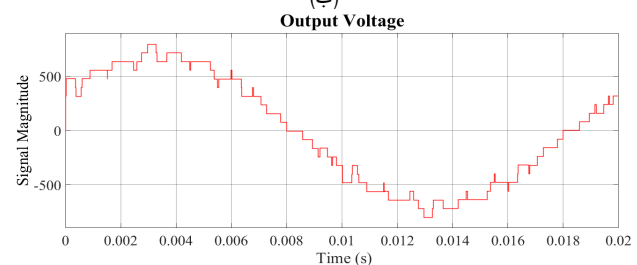
شکل ۸: مشخصه‌های اینورتر یازده‌سطحی با استفاده از روش کلیدزنی VFCB-PWM. (الف) شکل موج‌های مرجع و حامل، (ب) شکل موج ولتاژ فاز خروجی و (ج) شکل موج ولتاژ خطبه‌خط خروجی.



(الف)

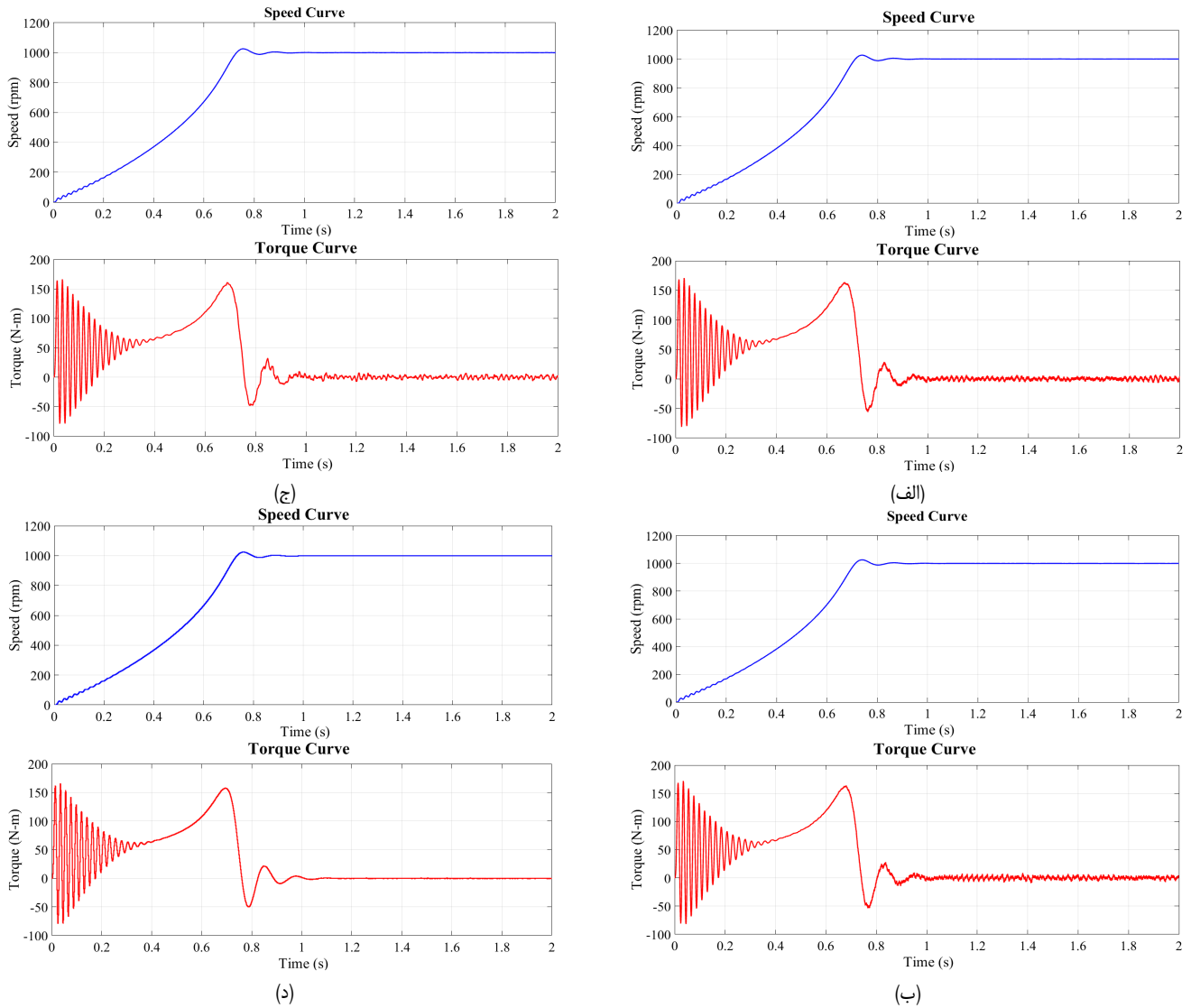


(ب)



(ج)

شکل ۹: مشخصه‌های اینورتر یازده‌سطحی با استفاده از روش کلیدزنی COOD-PWM. (الف) شکل موج‌های مرجع و حامل، (ب) شکل موج ولتاژ فاز خروجی و (ج) شکل موج ولتاژ خطبه‌خط خروجی.



شکل ۱۱: مشخصه‌های گشتاور و سرعت در موتور القایی، (الف) روش کلیدزنی CO-PWM، (ب) روش کلیدزنی COOD-PWM، (ج) روش کلیدزنی VFCB-PWM و (د) روش کلیدزنی VFCBOD-PWM.

در معادلات فوق V_1 مقدار مؤلفه اصلی ولتاژ خروجی و V_n سایر مؤلفه‌های هارمونیک را مشخص می‌کند.

از جمله مشخصه‌های خروجی در موتور القایی می‌توان به مشخصه‌های سرعت و گشتاور بر حسب زمان اشاره کرد. در [۱۸] مشخصه‌های ماشین القایی در اینورتر هفت، نه و یازده‌سطحی دیود-کلمپ با روش کلیدزنی چندحامله PD-PWM با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتیجه به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سطوح در اینورتر چندسطحی زمان رسیدن به حالت پایدار در نمودار سرعت-زمان و گشتاور-زمان به دلیل بهبود مشخصه‌های ولتاژ خروجی و نزدیک شدن شکل موج به شکل موج سینوسی، کمتر شده است.

همان طور که در شکل ۱۱ مشخص است در چهار روش مذکور کلیدزنی، تقریباً زمان رسیدن به حالت پایدار برابر است. همچنین مشاهده می‌شود که دامنه اعوجاج یا همان ریبیل در منحنی گشتاور-زمان در روش COOD-PWM نسبت به روش CO-PWM کمی کاهش یافته اما در روش VFCBOD-PWM نسبت به روش VFCB-PWM و دیگر روش‌ها، کاهش بسیار چشم‌گیری دارد به طوری که تقریباً تمام ریبیل گشتاور آن از بین رفته است. یکی از مهم‌ترین عواملی که سبب کم شدن این اعوجاج‌ها شده است عدم وجود زیرهارمونیک‌ها در ولتاژ خروجی است. همان طور که قبلاً بیان شد تابع منحنی ولتاژ خروجی در روش

(فرکانس موج حامل) برابر با ۱۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. اندازه ولتاژ ورودی DC اینورتر (خروجی یکسوکننده) برابر با ۸۰۰ ولت است. با استفاده از جدول ۳ می‌توان دریافت که در روش VFCBOD نسبت به روش VFCB، مقدار THD ولتاژ خروجی برای یک‌فاز ۰/۱۸٪، مقدار ولتاژ خروجی خط‌به‌خط ۰/۲۳٪ کاهش یافته و همچنین مقدار مؤثر ولتاژ خط ۰/۳ ولت افزایش یافته است. در روش COOD نسبت به روش CO، تنها مقدار THD ولتاژ خروجی برای هر فاز در حدود ۰/۱۱٪ کاهش یافته است. برای هر دو روش پیشنهادی مقدار DF نیز نسبت به روش‌های متداول بهبود داشته و برای به دست آوردن پارامترهای THD و DF، از (۱) و (۲) و ۲۰۰ هارمونیک اول استفاده شده است. همچنین با روش VFCBOD-PWM و طبق استاندارد ۵۱۹ IEEE STD [۲۳]، این روش کلیدزنی بدون هیچ گونه فیلتر برای ولتاژهای زیر ۱ کیلوولت، THD ولتاژ با مقدار مجاز زیر ۸٪ ارائه می‌دهد

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (1)$$

$$DF = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \quad (2)$$

- [11] J. Venkataramanaiah, Y. Suresha, and A. K. Panda, "A review on symmetric, asymmetric, hybrid and single DC sources based multilevel inverter topologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 788-812, Sept. 2017.
- [12] N. Prabaharan and K. Palanisamy, "A comprehensive review on reduced switch multilevel inverter topologies, modulation techniques and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1248-1282, Sept. 2017.
- [13] S. B. Ranjana, P. S. Wankhade, and N. D. Gondhalekar, "A modified cascaded h-bridge multilevel inverter for solar applications," in *Proc. Int. Conf. Green Computing Communication and Electrical Engineering, ICGCCEE'14*, 7 pp., Coimbatore, India, 6-8 Mar. 2014.
- [14] J. Sabarad and G. H. Kulkarni, "Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter," in *Proc. Int. Conf. Power and Advanced Control Engineering, ICPACE'15*, pp. 232-237, Bangalore, India, 12-14 Aug. 2015.
- [15] A. K. Ranjan, D. V. Bhaskar, and N. Parida, "Analysis and simulation of cascaded h-bridge multi-level inverter using level-shift PWM technique," in *Proc. IEEE Int. Conf. Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT'15*, 5 pp., Nagercoll, India, 19-20 Mar. 2015.
- [16] V. Bhuvaneswari and H. Kumar, "Analysis of asymmetrical and symmetrical three phase cascaded multilevel inverter using multicarrier SPWM techniques," in *Proc. Int. Conf. Green Computing Communication and Electrical Engineering, ICGCCEE'14*, 7 pp., Coimbatore, India, 6-8 Mar. 2014.
- [17] M. S. Orfi Yegane and M. Sarvi, "A new improved variable frequency triangular carrier- PWM with mopso algorithm for carrier based PWM techniques in inverters," *TEM J.*, vol. 6, no. 1, pp. 32-42, Feb. 2017.
- [18] F. Blaabjerg and K. Ma, "Speed control of induction motor using eleven levels inverter," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 15-20, Sept. 2013.
- [19] A. Chitra, W. R. Sultana, J. Vanishree, S. Sreejith, and S. Jose, "Performance comparison of multilevel inverter topologies for closed loop v/f controlled induction motor drive," *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 958-965, Jun. 2017.
- [20] S. Krishnapriya and L. Unnikrishnan, "Multilevel inverter fed induction motor drives," *International J. of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, no. 9, pp. 60-64, Aug. 2015.
- [21] O. Alavi, A. H. Viki, and S. Shamlou, "A comparative reliability study of three fundamental multilevel inverters using two different approaches," *J. of Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 1-18, Apr. 2016.
- [22] F. Richardeau and T. T. L. Pham, "Reliability calculation of multilevel converters: theory and applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4225-4233, Aug. 2013.
- [23] IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, pp. 1-213, 2014.

محمدصادق عرفی یگانه تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق قدرت در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه بوعلی سینا و مقطع کارشناسی ارشد را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به پایان رسانده و از سال ۱۳۹۵ دانشجوی دکتری همین دانشگاه است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: انرژی‌های تجدیدپذیر، نیروگاه‌های خورشیدی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، ساختارهای مبدل‌های الکترونیک قدرت، روش‌های کلیدزنی در مبدل‌های الکترونیک قدرت و کنترل موتورهای الکترونیکی.

نوید غفارزاده در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت را با رتبه ۱ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و مدرک دکتری خود در رشته مهندسی برق قدرت را با رتبه ۱ در سال ۱۳۹۰ دریافت کرد. دکتر غفارزاده عضو هیأت‌علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: حفاظت الکترونیکی سیستم‌های قدرت، شبکه‌های هوشمند الکترونیکی، انرژی‌های نو و الگوریتم‌های بهینه‌سازی.

محمد سروی مدارک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی برق قدرت از دانشگاه علم و صنعت دریافت کرد. دکتر سروی عضو هیأت‌علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، انرژی‌های نو و بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت.

VFCBOD یک تابع فرد است و بنابراین هارمونیک‌های زوج و مقادیر DC از آن حذف گردیده‌اند. نتایج به دست آمده با روش‌های پیشنهاد شده در مقایسه با نتایج به دست آمده در [۱۸] برای یک اینورتر یازده‌سطحی، بیانگر بهبود رپیل‌ها در نمودار گشتاور- زمان به ویژه برای روش VFCBOD-PWM است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش‌های کلیدزنی و کنترل جدیدی برای راه‌اندازی موتور القایی با استفاده از اینورتر چندسطحی دیود- کلمپ پیشنهاد گردیده است. روش‌های پیشنهادی VFCBOD-PWM و COOD-PWM، روش‌های کلیدزنی پهنای پالس مدولاسیون سینوسی چندحامله بر پایه موج حامل است. در این روش‌ها با اعمال یک شیفت فازی و سپس سنکرون کردن تمامی موج‌های حامل، شکل موج ولتاژ خروجی در هر فاز به یک شکل موج با تابع فرد تبدیل گردیده که در آن مؤلفه‌های هارمونیک زوج و مؤلفه DC حذف گردیده‌اند و بهبود کیفیت در مشخصه‌های ولتاژ خروجی حاصل گردیده است. روش کنترل سرعت استفاده‌شده، روش حلقه باز V/f است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که دامنه اعوجاج در مشخصه گشتاور در روش‌های پیشنهادی کمتر از روش‌های مرسوم است. علاوه بر آن در این مقاله یک اینورتر یازده‌سطحی دیود- کلمپ سری شده با یک اینورتر تمام‌پل در هر فاز برای راه‌اندازی و کنترل سرعت موتور القایی سه‌فاز به کار گرفته شده است. این امر سبب می‌شود تا الگوهای بیشتر کلیدزنی برای تولید یک سطح ولتاژ به دست آید و بنابراین قابلیت اطمینان اینورتر افزایش می‌یابد و همچنین با توزیع مناسب این دفعات کلیدزنی میان کلیدهای قدرت کاهش و طول عمر آنها افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, 2002.
- [2] G. Renukadevi and K. Rajambal, "Generalized d-q model of n-phase induction motor drive," *International J. of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 6, no. 9, pp. 1066-1075, 2012.
- [3] M. A. Hannan, J. A. Ali, A. Mohamed, and A. Hussain, "Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pt. 2, vol. 81, pp. 1611-1626, Jan. 2017.
- [4] J. Jose and A. Chitra, "Field oriented control of space vector modulated multilevel inverter fed pmsm drive," *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 966-973, Jun. 2017.
- [5] Z. Guoa, J. Zhanga, Z. Suna, and C. Zhenga, "Indirect field oriented control of three-phase induction motor based on current-source inverter," *Procedia Engineering*, vol. 174, pp. 588-594, Mar. 2017.
- [6] I. M. Alsofyani and N. R. N. Idris, "A review on sensorless techniques for sustainable reliability and efficient variable frequency drives of induction motors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 111-121, Aug. 2013.
- [7] A. Pal, R. Kumar, and S. Das, "Sensorless speed control of induction motor driven electric vehicle using model reference adaptive controller," *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 540-551, Dec. 2016.
- [8] J. M. Pena and E. V. Diaz, "Implementation of v/f scalar control for speed regulation of a three-phase induction motor," in *Proc. IEEE ANDESCON'16*, 4 pp., Arequipa, Peru, 19-21 Oct. 2016.
- [9] A. T. Baitade and S. S. Chopade, "Harmonic reduction, power factor improvement and speed detection for 3-phase induction motor drive system," in *Proc. Conf. on Advances in Signal Processing, CASP'16*, pp. 406-411, Pune, India, 9-11 Jun. 2016.
- [10] K. K. Gupta, A. Ranjan, and P. Bhatnagar, "Multilevel inverter topologies with reduced device count: a review," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 135-151, Feb. 2016.