

اینورتر جدید سوئیچ کاهش یافته ۱۱۵ ولتی، ۴۰۰ هرتز جهت استفاده در منبع تغذیه اضطراری هواپیما

حسین بشتار^{۱*}، علیرضا ناطقی^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰)

چکیده

این مقاله به معرفی شماتیک و ساختار جدید یک موج‌ساز (اینورتر) چندسطحی ۱۱۵ ولت AC با فرکانس خروجی ۴۰۰ هرتز برای استفاده در منبع تغذیه اضطراری هواپیما و سامانه توزیع توان الکتریکی هواپیما می‌پردازد. توان ورودی این مبدل از طریق اتصال به باس DC هواپیما و یا توسط یک پاد مجهز به توربین بادی و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم تامین می‌گردد. به‌منظور تثبیت ولتاژ متغیر تولید شده توسط توربین بادی، از یک مبدل افزایش‌دهنده درهم بهره‌گیری شده است. افزون بر این، طراحی مبدل مورد نظر به نحوی صورت گرفته که در مقایسه با سایر مبدل‌های مرسوم و جدید، دارای تعداد قطعات کمتری می‌باشد. مبدل پیشنهادی قادر به تولید شکل موج ولتاژ خروجی ۲۵-سطحی با قابلیت افزایش ولتاژ ورودی می‌باشد. عدم نیاز به فیلتر در خروجی مبدل به علت اعوجاج هارمونیک کل بسیار پایین این مبدل و مطابق بودن آن با استاندارد IEEE 519-2022 از دیگر ویژگی‌های شایان توجه مبدل ارائه شده است. این ویژگی سبب کاهش چشم‌گیر وزن و حجم منبع تغذیه هواپیما در مقایسه با سایر ساختارهای موجود می‌شود که به طور خاص برای کاربرد هوایی، در هر دو نوع نظامی و تجاری اهمیتی دوچندان می‌یابد. کارایی و عملکرد ساختار پیشنهادی تحت شرایط تغییر بار و تغییر سرعت باد و هواپیما در هنگام اتصال به توربین بادی و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در محیط شبیه‌سازی MATLAB/SIMULINK بررسی و تایید شده است.

واژه‌های کلیدی: اینورتر چندسطحی، توربین بادی، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، اعوجاج هارمونیک کل

A Novel 115V, 400Hz reduced switch inverter for use in aircraft emergency power supply

Abstract

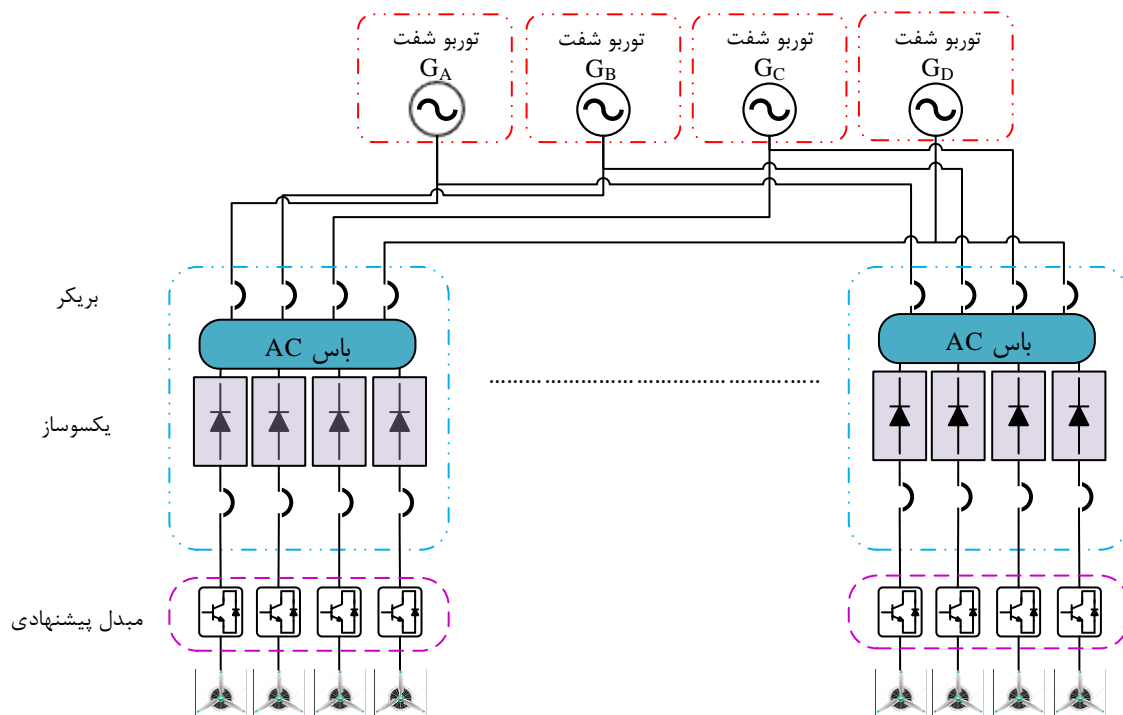
This paper introduces the schematic and new structure of a 115V AC multilevel inverter with an output frequency of 400Hz for use in the emergency power supply of aircraft and the electrical distribution system of aircraft. The input power of this converter is provided by connecting to the DC bus of the aircraft or by a pod equipped with a wind turbine and permanent magnet synchronous generator. In order to stabilize the variable voltage produced by the wind turbine, an interleaved boost converter has been used. In addition, the design of the desired converter has been made in such a way that compared to other conventional and novel converters, it has fewer parts. The proposed converter is able to produce a 25-level output voltage waveform with the ability to increase the input voltage. No need for a filter in the output of the converter due to the very low total harmonic distortion of this converter and its compliance with the IEEE 519-2022 standard are other noteworthy features of the converter. This feature causes a significant reduction in the weight and volume of the power supply of the aircraft compared to other available structures, which is especially important for air applications, both military and commercial types. The efficiency and performance of the proposed structure under the conditions of load change and wind and aircraft speed change when connected to a wind turbine and permanent magnet synchronous generator have been checked and confirmed in MATLAB/SIMULINK simulation environment.

Key words: Multilevel Inverter, Wind Turbine, Permanent Magnet Synchronous Generator, Total Harmonic Distortion

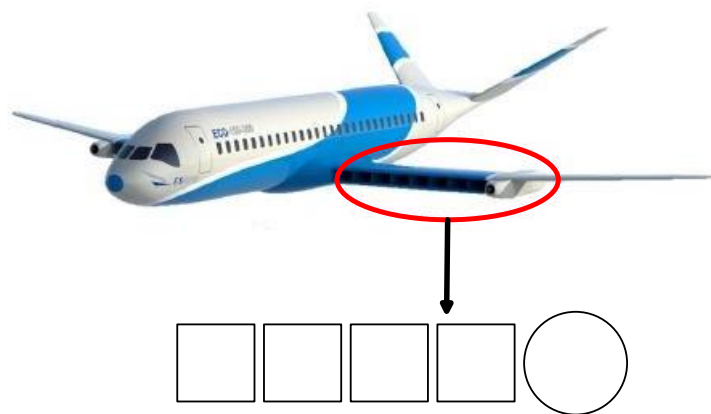
مقدمه

در هواپیماهای مدرن، محرک‌های هیدرولیک^۱ یا پنوماتیک^۲ توسط نمونه‌های الکتریکی جایگزین شده‌اند، پیشرفت فن‌آوری مبدل‌ها و موتور، امکان تغذیه سیستم رانش با منابع الکتریکی را فراهم کرده است [۱]. این نیازهای توان بالا را نمی‌توان با استفاده از یک مبدل دوسطحی معمولی به طور موثر برآورده کرد. مبدل‌های چندسطحی یک راه حل مناسب برای این کاربرد می‌باشند [۲-۴]. مبدل‌های چندسطحی به دلیل مزایایی همچون کاهش فشار ولتاژ بر روی سویچ‌ها، کاهش تداخلات الکترومغناطیسی^۳، کاهش اعوجاج هارمونیک کل^۴ برتری چشمگیری نسبت به مبدل‌های دوسطحی دارند [۵-۸]. در حالی که توپولوژی‌های کلاسیک هنوز در بعضی از حوزه‌ها به کار می‌روند، تقاضای فراوانی جهت استفاده از توپولوژی‌های چندسطحی جدیدتر با هدف کاهش تعداد ادوات نیمه‌هادی قدرت، درایورها و منابع DC ایزوله و در نتیجه کاهش هزینه و افزایش کارایی وجود دارد [۹]. با توجه به مطالب بیان شده، یک مبدل چندسطحی که علاوه بر ویژگی‌ها ذکر شده به دلیل تعداد بالای سطوح ولتاژ به فیلتر نیز نیاز ندارد، به منظور بکارگیری در سیستم تامین و توزیع توان الکتریکی هواپیما طراحی شده است. این ساختار توانایی استفاده در دو حالت

کاری را دارا می‌باشد. در حالت اول این ساختار را می‌توان به عنوان یک ساختار جدید در سامانه اصلی تامین توان الکتریکی هواپیما بکار برد. در این حالت ساختار مبدل با اتصال مستقیم به باس DC، باتری و یا پیل سوختی هواپیما تغذیه می‌شود و یا به طور مستقیم پس از یکسوسازی باس AC در [۱۰] زنجیره-ی انتقال توان قرار خواهد گرفت. برای مثال شکل ۱ معماری توزیع توان هواپیمای هیبریدی-الکتریکی^۵ DRAGON در و جایگاه استفاده از ساختار مبدل نشان داده شده است. اما در حالت دوم می‌توان از ساختار به عنوان یک منبع تامین توان کمکی و در منبع تغذیه اضطراری هواپیما استفاده کرد. در این حالت، ابتدا یک یا چند توربین کوچک در زیر بدنه هواپیما نصب می‌شود و یا در بدنه بال تقسیم شده، در بین پروانه‌های کانالی^۶ مطابق شکل ۲ قرار می‌گیرد [۱۱]. سپس یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم^۷ به توربین متصل می‌شود. از آن جایی که ولتاژ خروجی ژنراتور به دلیل متغیر بودن سرعت باد و هواپیما متفاوت خواهد بود، یک مبدل افزایشی^۸ در بعد از یکسوسازی ولتاژ تولیدی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به کار گرفته می‌شود. پس از تثبیت ولتاژ تولیدی توسط مبدل



شکل ۱- معماری توزیع توان هواپیمای هیبریدی-الکتریکی DRAGON در [۱۰]



توربو شفت و ژنراتور پروانه های کانالی

شکل ۲- محل قرارگیری توربو شفت و ژنراتور و پروانه های کانالی طرح هواپیمای ارائه شده در [۱۱،۱۲]

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\lambda + 0.089} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (۳)$$

رابطه (۴) بین سرعت باد و سرعت روتور به عنوان نسبت سرعت نوک^{۱۰} تعریف می شود که در آن که در آن ω سرعت زاویه ای تیغه و R شعاع روتور است.

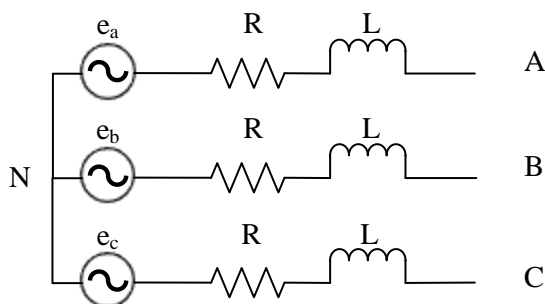
$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{v} \quad (۴)$$

و در نهایت مقدار گشتاور با رابطه ی (۵) به دست می آید.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} \quad (۵)$$

مدل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

مدار معادل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در شکل ۳ نشان داده شده است. در مدل ارائه شده، e_a ، e_b و e_c نیروهای محرکه القایی و R و L به ترتیب مقاومت و اندوکتانس ژنراتور



شکل ۳- مدار معادل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

افزاینده در هم، خروجی آن به ساختار طراحی شده، متصل می شود و ولتاژ و جریان متناسب جهت مصارف هواپیما تامین می نماید. در این مقاله ابتدا مدل سازی توربین بادی^۹ و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به همراه طراحی میدل افزایشده در هم بیان می شود. سپس طراحی میدل ارائه شده و نحوه ی عملکرد آن توضیح داده می شود. سرانجام با انجام شبیه سازی از کل مجموعه در حالت تک فاز و سه فاز، تحلیلی از نتایج ارائه می شود.

مدل توربین بادی

برای مدل سازی توربین بادی از رابطه های (۱) تا (۵) بهره گرفته شده است. مقدار توان مکانیکی که از انرژی جنبشی باد توسط توربین بادی جذب شده به کمک رابطه ی (۱) به دست می آید [۱۲].

$$P_m = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (۱)$$

که در آن ρ چگالی هوا، A مساحت جاروب شده توسط پره های توربین، v سرعت باد و $C_p(\lambda, \beta)$ ضریب توان است که رابطه بین نسبت سرعت نوک λ و زاویه گام β را بیان می کند. معادله ی ضریب توان در رابطه ی (۲) و (۳) نشان داده شده است.

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\gamma} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot \exp\left(-\frac{12.5}{\gamma}\right) \quad (۲)$$

یعنی P_C صرف تغییر ولتاژ خازن می‌شود. معادلات حاکم بر سیستم در روابط (۱۲) تا (۱۴) بیان شده است.

$$P_T(v_w, \omega_m) - P_{em}(\omega_m, V_{dc}) = J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (12)$$

$$P_{em}(\omega_m, V_{dc}) - P_R(\omega_m, V_{dc}) = P_o(\omega_m, V_{dc}) \quad (13)$$

$$P_o(\omega_m, V_{dc}) - P_L(V_{dc}, I_L) = C_{dc} V_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (14)$$

در رابطه‌ی (۱۲) J اینرسی کل توربین بادی و ژنراتور مغناطیس دائم است. در حالت ماندگار سیستم دو رابطه‌ی (۱۲) و (۱۴) به ترتیب به رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) تبدیل می‌شوند.

$$P_T(v_w, \omega_m) = P_{em}(\omega_m, V_{dc}) \quad (15)$$

$$P_o(\omega_m, V_{dc}) = P_L(V_{dc}, I_L) \quad (16)$$

طراحی مبدل افزایشده در هم

شکل ۵ یک مبدل افزایشده در هم را نمایش می‌دهد. دلیل استفاده از مبدل افزایشده در هم به جای مبدل افزایشده سنتی، ویژگی‌هایی همچون اعوجاج ولتاژ و جریان کم‌تر، تلفات کلیدزنی کم‌تر، راندمان بالاتر و پاسخ‌گذاری سریع‌تر این مبدل می‌باشد. نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای مهم طراحی در رابطه‌های (۱۷) تا (۲۰) نشان داده شده است. که در آن‌ها V_o ولتاژ خروجی، V_{in} ولتاژ ورودی، $V_{in, min}$ حداقل ولتاژ ورودی، F_{sw} فرکانس کلیدزنی، I_{ripple} اعوجاج جریان خروجی، R_{min} حداقل بار خروجی، D_{max} بیشینه نسبت وظیفه، ΔV_o تغییرات ولتاژ خروجی، L_{min} حداقل اندوکتانس مورد نیاز و C_{min} حداقل خازن مورد نیاز می‌باشد.

سنکرون مغناطیس دائم و خط می‌باشند. رابطه‌های متناسب مدل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در رابطه‌های (۶) تا (۱۱)، بیان شده شده است. در روابط بیان شده، E مقدار RMS نیروی محرکه القایی، θ زاویه‌ی الکتریکی، k ثابت ولتاژ ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، ω سرعت الکتریکی، p تعداد جفت قطب‌ها و ω_m سرعت مکانیکی است [۱۳].

$$e_a = \sqrt{2}E \sin(\theta) \quad (6)$$

$$e_b = \sqrt{2}E \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (7)$$

$$e_c = \sqrt{2}E \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (8)$$

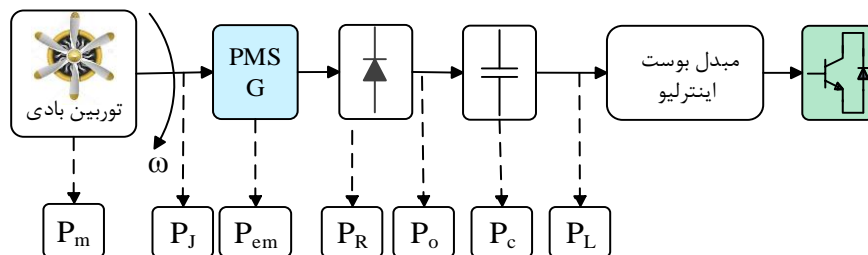
$$E = K \cdot \omega \quad (9)$$

$$\theta = \omega \cdot t \quad (10)$$

$$\omega = p \cdot \omega_m \quad (11)$$

چینش کلی سیستم و توزیع توان

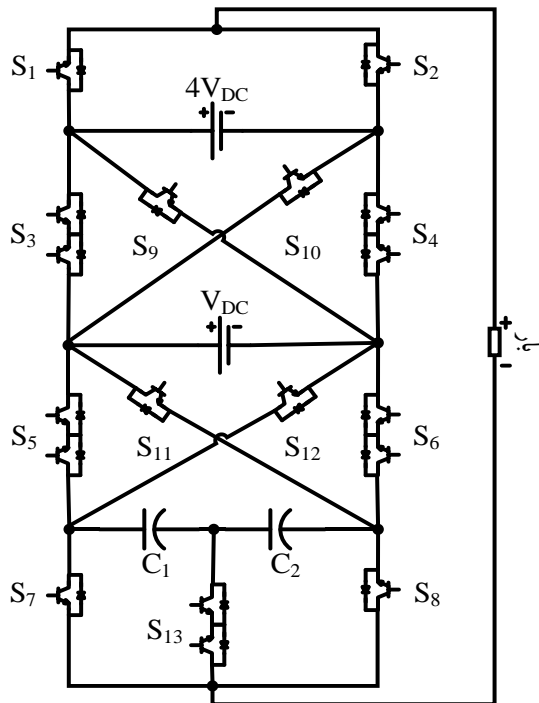
در شکل ۴ چینش کلی سیستم، ترتیب و نحوه‌ی توزیع توان آن نشان داده شده است. توان P_T نشان‌دهنده توان جذب شده توسط توربین بادی پس از کسر تلفات اصطکاک است. بخشی از این توان توسط ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم جذب می‌شود و باقیمانده آن یعنی P_J سرعت شفت را تغییر می‌دهد. توان که وارد ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم می‌شود، توان الکترومغناطیسی آن P_{em} است. با نادیده گرفتن تلفات مغناطیسی ماشین و تلفات پل دیود، توان الکترومغناطیسی P_{em} به تلفات مقاومتی ناشی از PMSG و خط P_R و توان خروجی پل دیود یعنی P_o تقسیم می‌شود. در نهایت، بیشتر P_o یعنی توان P_L وارد مبدل افزایشده در هم می‌شود و بقیه توان



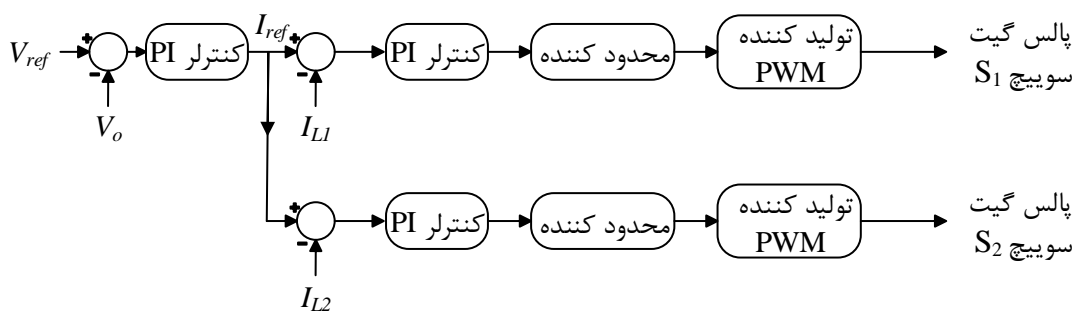
شکل ۴- چینش کلی سیستم و نحوه‌ی توزیع توان

طراحی مبدل چندسطحی

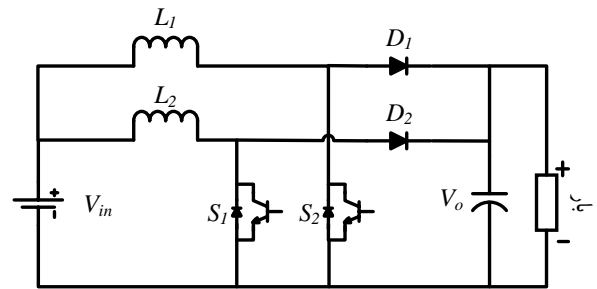
شکل ۷ ساختار مبدل ۲۵ سطحی طراحی شده در حالت تکفاز را نشان می‌دهد. این مبدل ولتاژ خروجی ۲۵ سطحی را به کمک ۱۳ سویچ شامل ۸ سویچ یک جهته و ۵ سویچ دوجته، دو خازن و دو منبع DC ایزوله تولید می‌کند. همچنین مبدل ارائه شده می‌تواند یک ولتاژ خروجی دوقطبی بدون استفاده از پل H تولید کند. بنابراین هیچ کلیدی مجبور نیست اوج ولتاژ خروجی را تحمل کند و در نتیجه مبدل دارای بیشینه ولتاژ سد پایین^{۱۱} و ولتاژ سد کل پایین^{۱۲} است. افزون بر این توازن ولتاژ خازن‌های مبدل بدون استفاده از سنسور و تنها با استفاده از حالت‌های کلیدزنی مناسب صورت گرفته است. همچنین از روش مدولاسیون نزدیک‌ترین سطح^{۱۳} برای کنترل عملکرد مبدل پیشنهادی استفاده شده است.



شکل ۷- ساختار مبدل ۲۵ سطحی در حالت تکفاز



شکل ۶- بلوک دیاگرام کنترل مبدل افزایشنده در هم



شکل ۵- مبدل افزایشنده در هم

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (17)$$

$$D_{max} = \frac{V_o - V_{in,min}}{V_o} \quad (18)$$

$$L_{min} = \frac{V_{in,min} \cdot D_{max}}{F_{sw} \cdot I_{ripple}} \quad (19)$$

$$C_{min} = \frac{V_o \cdot D_{max}}{\Delta V_o \cdot R_{min} \cdot F_{sw}} \quad (20)$$

همچنین بلوک دیاگرام کنترل مبدل افزایشنده در هم در شکل ۶ نشان داده شده است. جهت تثبیت ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، حداقل سرعت و توان تولیدی و در نتیجه حداقل ولتاژ خروجی یکسوساز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای ولتاژ ورودی مبدل افزایشنده در هم از رابطه-۱ (۲۱) استفاده می‌کنیم. که در آن V_{LPEAK} پیک ولتاژ خط، در زمانی که کمترین توان و ولتاژ توسط ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم تولید می‌شود.

$$V_{in,min} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_S = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_{LPEAK}}{\sqrt{3}} = \frac{3}{\pi} V_{LPEAK} \quad (21)$$

پیشنهادی استفاده شده است.

محاسبه‌ی ظرفیت خازن‌ها

محاسبه ظرفیت خازن برای اطمینان از این که ولتاژ خازن بیش از مقدار مشخصی نوسان نمی‌کند، ضروری است. از آنجایی که این ولتاژها به ترکیب ولتاژ خروجی کمک می‌کنند، ریپل ولتاژ خازن‌ها به یک محدوده انتخاب شده محدود می‌شود. این افت ولتاژ به بزرگی جریان خروجی، فرکانس خروجی و زمان شارژ و دشارژ خازن‌ها بستگی دارد [۱۴]. بنابراین، مقدار شارژ پمپ شده به خروجی توسط خازن‌ها را می‌توان محاسبه کرد و جهت تعیین ظرفیت خازن برای یک اعوجاج ولتاژ مجاز استفاده کرد. حداکثر دشارژ هر خازن ΔQ_{Ci} با رابطه (۲۲) به دست می‌آید. در رابطه (۲۲)، f_{out} فرکانس خروجی و I_{out} دامنه جریان خروجی می‌باشد.

حالت‌های کلیدزنی مبدل طراحی شده

در بین حالت‌های کلیدزنی مختلف، توالی و حالت‌هایی انتخاب شده که ولتاژ هر خازن به اندازه نصف ولتاژ منبع DC ایزوله میانی شارژ شود و بر روی این مقدار بماند. در واقع میزان دشارژ هر خازن در سطح مثبت با میزان دشارژ خازن دیگر در سطح متناظر منفی برابر است بنابراین تغییر در وضعیت شارژ خازن و در نتیجه ولتاژ آن‌ها به وجود نمی‌آید. حالت‌های کلیدزنی مبدل در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین وضعیت شارژ (\uparrow) و دشارژ (\downarrow) خازن در هر یک از حالت‌های کلیدزنی در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱- حالت‌های کلیدزنی مبدل ۲۵ سطحی

حالت‌های کلیدزنی	وضعیت سوییچ‌ها (۱: روشن، ۰: خاموش)													وضعیت شارژ خازن‌ها		ولتاژ خروجی
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	C1	C2	
+۱۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	↓	↓	+۶V _{DC}
+۱۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	↓	-	+۵,۵V _{DC}
+۱۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	↑	↑	+۵V _{DC}
+۹	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	↓	-	+۴,۵V _{DC}
+۸	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	↑	↑	+۴V _{DC}
+۷	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	↓	-	+۳,۵V _{DC}
+۶	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	-	+۳V _{DC}
+۵	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	-	↑	+۲,۵V _{DC}
+۴	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	↑	↑	+۲V _{DC}
+۳	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	↓	-	+۱,۵V _{DC}
+۲	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	↑	↑	+۱V _{DC}
+۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	↓	-	+۰,۵V _{DC}
۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	↑	↑	۰
-۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-	↓	-۰,۵V _{DC}
-۲	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	↑	↑	-۱V _{DC}
-۳	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	-	↓	-۱,۵V _{DC}
-۴	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	↓	↓	-۲V _{DC}
-۵	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	↑	-	-۲,۵V _{DC}
-۶	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	-	-	-۳V _{DC}
-۷	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-	↓	-۳,۵V _{DC}
-۸	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	↑	↑	-۴V _{DC}
-۹	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-	↓	-۴,۵V _{DC}
-۱۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	↑	↑	-۵V _{DC}
-۱۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	-	↓	-۵,۵V _{DC}
-۱۲	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	↓	↓	-۶V _{DC}

$$P_{s,off} = \frac{1}{6} f_s V_{off-state} I_{on-state} t_{off} \quad (25)$$

در نتیجه، مجموع تلفات کلیدزنی مدار که برابر با مجموع تلفات روشن و خاموش شدن است با رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$P_{SW} = \sum_{i=1}^{N_{switch}} (P_{S_i,on} + P_{S_i,off}) \quad (26)$$

تلفات هدایتی برای سویچ‌ها و دیودهای قدرت در هر سطح با رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود [۱۶]. که در آن، V_{on}^D و V_{on}^{SW} به ترتیب ولتاژ حالت روشن سویچ‌ها و دیودها هستند. همچنین R_{on}^{SW} مقاومت سوئیچ‌ها در حالت روشن و R_{on}^D مقاومت دیودها در حالت روشن است. تعداد عناصر موثر مدار در تشکیل هر سطح در جدول ۲ نمایش داده شده است.

$$P_{con-L} = (K_1 V_{on}^{SW} + K_2 V_{on}^D) i_{av-L} + (K_1 R_{on}^{SW} + K_2 R_{on}^D) i_{rms-L}^2 \quad (27)$$

علاوه بر این، i_{rms-L} و i_{avg-L} به ترتیب مقدار جریان موثر و متوسط نیمه‌هادی‌ها می‌باشند که مطابق رابطه‌های (۲۸) و (۲۹) در هر سطح برای بازه‌ی زمانی $[t_a, t_b]$ که شامل نیمی از یک چرخه است، به دست می‌آیند.

$$i_{av-L} = \frac{2}{T} \int_{t_a}^{t_b} I_m \sin \omega t dt \quad (28)$$

$$i_{rms-L} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_a}^{t_b} (I_m \sin \omega t)^2 dt} \quad (29)$$

در نهایت، تلفات هدایتی کل مبدل ارائه شده از رابطه (۳۰) به دست می‌آید.

$$P_{con}^{total} = \sum_{L=1}^6 P_{con-L} \quad (30)$$

تفاوت در مقدار نصف ولتاژ منبع ورودی $V_{DC}/2$ و ولتاژ هر خازن، عامل ایجاد تلفات اعوجاج خازن می‌باشد. اعوجاج ولتاژ خازن از رابطه (۳۱) به دست می‌آید. I_c جریان خازن و بازه $[t_c, t_d]$ طولانی‌ترین بازه زمانی دشارژ خازن است.

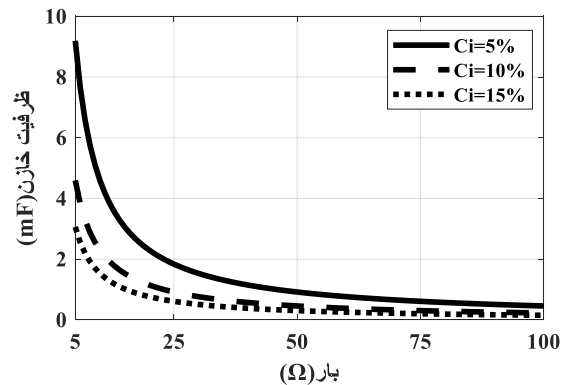
$$\Delta Q_{Ci} = \int_{t_{i1}}^{t_{i2}} I_{out} \sin(2\pi f_{out} t - \phi) dt \quad (22)$$

بازه $[t_{i1}, t_{i2}]$ زمانی است که طولانی‌ترین دوره تخلیه خازن اتفاق می‌افتد. چون لینک DC کمکی توسط منبع DC ورودی تغذیه می‌شود، ولتاژی که روی خازن‌ها قرار می‌گیرد برابر با نیمی از دامنه منبع ورودی است. بنابراین ظرفیت دو خازن یکسان خواهد بود. سپس، با فرض حداکثر اعوجاج ولتاژ k و بار مقاومتی R ، ظرفیت خازن‌ها برای ساختار پیشنهادی را می‌توان با رابطه (۲۳) محاسبه نمود. بر همین اساس، شکل ۸ تغییرات ظرفیت خازن بر اساس تغییرات بار و اعوجاج را نشان می‌دهد.

$$C \geq \frac{\Delta Q_{Ci}}{k V_{dc}} = \frac{6}{K \cdot R} \int_{t_{i1}}^{t_{i2}} \sin(2\pi f_{out} t - \phi) dt \quad (23)$$

محاسبه تلفات توان

به طور کلی تلفات توان در مبدل ارائه شده به سه گروه تلفات کلیدزنی، تلفات هدایتی و تلفات ناشی از اعوجاج ولتاژ خازن طبقه‌بندی می‌شود. تلفات کلیدزنی به دلیل تاخیر در روشن و خاموش شدن سوئیچ ایجاد می‌شود که می‌توان آن را با رابطه‌های (۲۴)، (۲۵) محاسبه کرد [۱۵]. که در آن‌ها f_s فرکانس کلیدزنی، $V_{off-state}$ ولتاژ سوئیچ در حالت خاموش و $I_{on-state}$ جریان سوئیچ در زمان روشن بودن کامل سوئیچ می‌باشد.

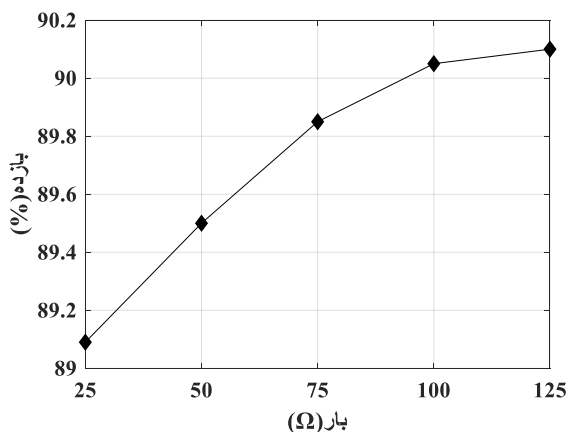


شکل ۸- تغییرات ظرفیت خازن بر اساس تغییرات بار و اعوجاج

$$P_{s,on} = \frac{1}{6} f_s V_{off-state} I_{on-state} t_{on} \quad (24)$$

مبدل هستند. شکل ۹ منحنی بازده مدار را برای بارهای مختلف ارائه می‌دهد.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{SW} + P_{con} + P_{Rip}} \quad (33)$$



شکل ۹- منحنی بازدهی مدار طراحی شده به ازای بارهای مختلف

شبیه‌سازی سیستم و مبدل پیشنهادی

ابتدا مبدل پیشنهادی و سیستم شامل توربین بادی، ژنراتور مغناطیس دائم و مبدل افزایشنده در هم به صورت تکفاز در محیط Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده و تمام پارامترهای مهم مورد بررسی قرار می‌گیرند، سپس حالت سه‌فاز نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. پارامترهای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم و مبدل‌های افزایشنده در هم استفاده شده در شبیه‌سازی به ترتیب در جدول ۳ و جدول ۴ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، توربین دارای سرعت پایه باد ۲۷۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است زیرا سرعت میانگین هواپیماها چیزی حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ نات (تقریباً معادل ۲۰۰ تا ۲۶۰ متر بر ثانیه) بوده و سرعت باد برخوردی به توربین برابر با سرعت هواپیما فرض شده است. بدیهی است که در صورت متفاوت بودن میزان حقیقی سرعت باد می‌توان توربین با سرعت پایه مناسب قرار داد که تاثیری در روند اصلی شبیه‌سازی ندارد. منحنی توان تولیدی توربین بادی با سرعت‌های گوناگون در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. برای بررسی عملکرد سیستم ابتدا عملکرد بخش‌های مختلف در سرعت ثابت ۲۶۰ متر بر ثانیه بررسی می‌شود.

$$\Delta V_{ripple,C} = \frac{1}{C} \int_{t_a}^{t_b} i_c(t) dt \quad (31)$$

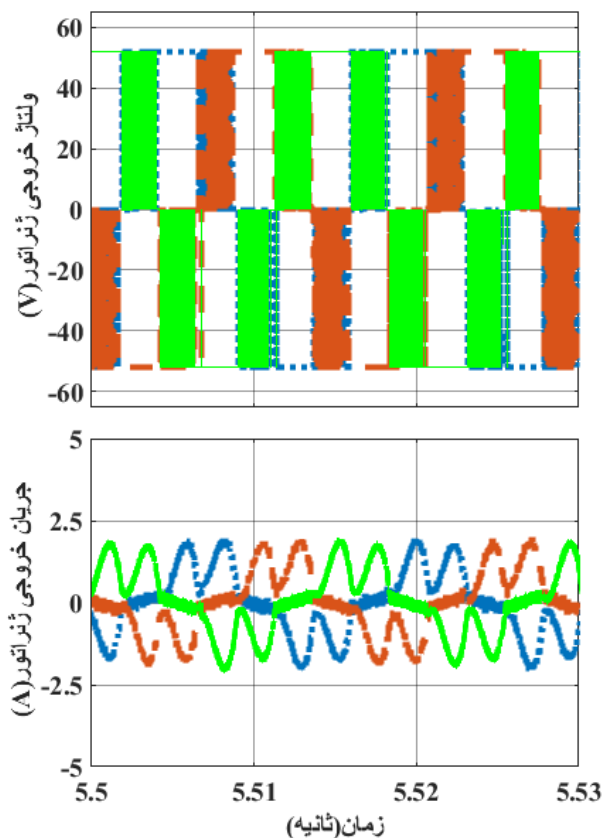
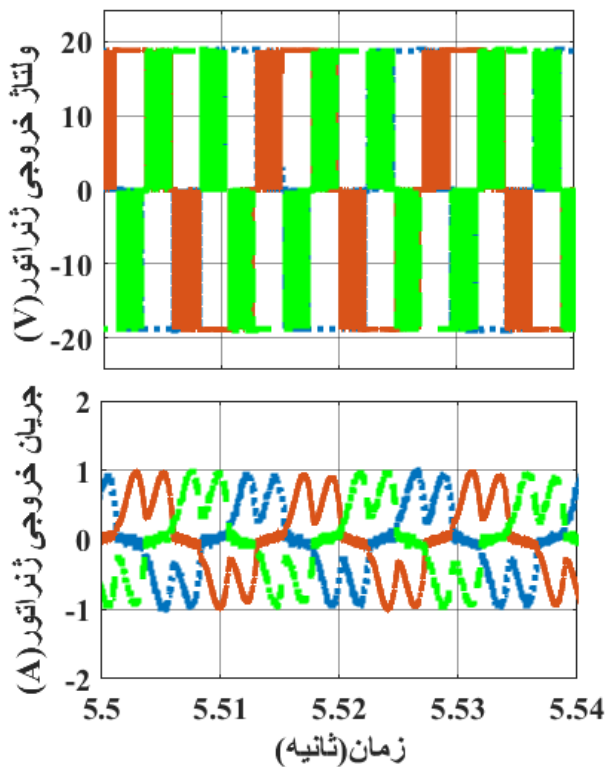
جدول ۲- تعداد عناصر موثر مدار در تشکیل هر سطح

سطح ولتاژ خروجی	مقاومت معادل	
	K _{sw}	K _D
+۱۲	۴	۰
+۱۱	۴	۱
+۱۰	۵	۲
+۹	۴	۲
+۸	۳	۲
+۷	۴	۳
+۶	۳	۳
+۵	۳	۳
+۴	۲	۳
+۳	۴	۲
+۲	۵	۳
+۱	۴	۳
۰	۵	۳
-۱	۳	۴
-۲	۳	۵
-۳	۲	۴
-۴	۳	۲
-۵	۳	۳
-۶	۳	۳
-۷	۳	۴
-۸	۲	۳
-۹	۲	۴
-۱۰	۲	۵
-۱۱	۱	۴
-۱۲	۰	۴

تلفات ناشی از اعوجاج ولتاژ خازن به کمک رابطه (۳۲) محاسبه می‌شود.

$$P_{Rip} = \frac{f_{out}}{2} (C_i \Delta V_{ripple,c}^2) \quad (32)$$

در نهایت، بازدهی^{۱۴} مبدل با رابطه (۳۳) محاسبه می‌شود. که در آن P_{out} و P_{loss} به ترتیب توان تلف شده و توان خروجی

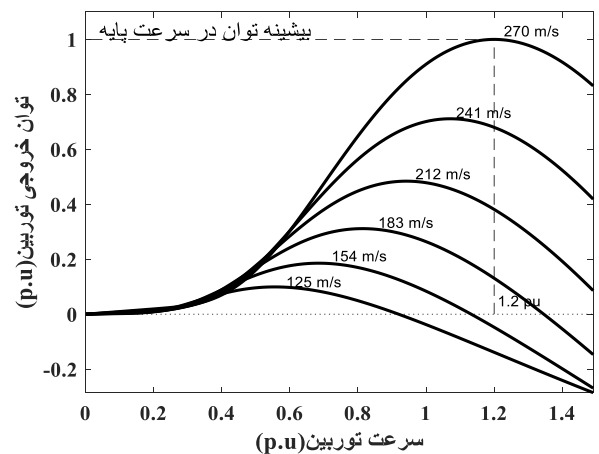


جدول ۳- مشخصات ژنراتور PMSG شبیه سازی

پارامترها	ژنراتور ۱	ژنراتور ۲
مقاومت فاز استاتور (Ω)	۰,۱۸	۰,۱۸
اندوکتانس آر میچر (H)	۰,۰۰۰۸۳۵	۰,۰۰۰۸۳۵
اینرسی (Kg.m^2)	۰,۰۰۰۶۲۴	۰,۰۰۰۶۲۱
ضریب میرایی ویسکوز (N.m.s)	۰,۰۰۰۳۰۳	۰,۰۰۰۳۰۳
شار (V.s)	۰,۰۷۱۴	۰,۰۲۶۱
تعداد قطب	۴	۴

جدول ۴- مشخصات مبدل‌های افزایشنده در هم

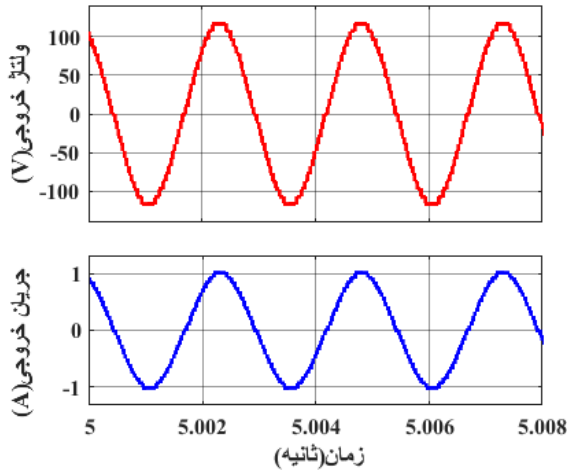
پارامترها	مبدل افزایشنده در هم 4VDC	مبدل افزایشنده در هم VDC
فرکانس کلیدزنی (KHz)	۱۰۰	۱۰۰
اندوکتانس القاگر (mH)	۱,۷	۰,۵
ظرفیت خازن (μF)	۴۷۰۰	۴۷۰۰



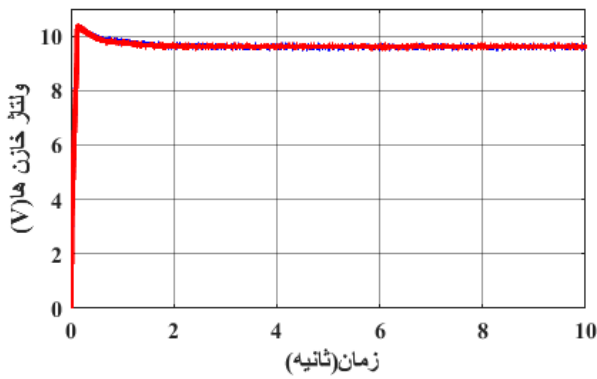
شکل موج ولتاژ خروجی ژنراتور ۱ و ۲ در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نشان داده شده است. ولتاژ توربین پس از مدتی به تثبیت می‌رسد. بدیهی است که این تاخیر برای رسیدن به ولتاژ نامی در سرعت مد نظر ناشی از اینرسی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم می‌باشد. همچنین در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ ولتاژ خروجی پس از یکسوسازی ولتاژ ژنراتورها و تثبیت آن به مقدار مطلوب توسط مبدل‌های افزایشنده در هم جهت استفاده در مبدل نمایش داده شده است. در نهایت شکل ۱۵ و ۱۶، ولتاژ و جریان خروجی مبدل ۲۵-سطحی را تحت بار مقاومتی و سلفی-مقاومتی موجود در جدول ۵ و تعادل ولتاژ خازن‌های مبدل را نشان می‌دهد.

جدول ۵- بارهای خروجی مبدل در شبیه سازی

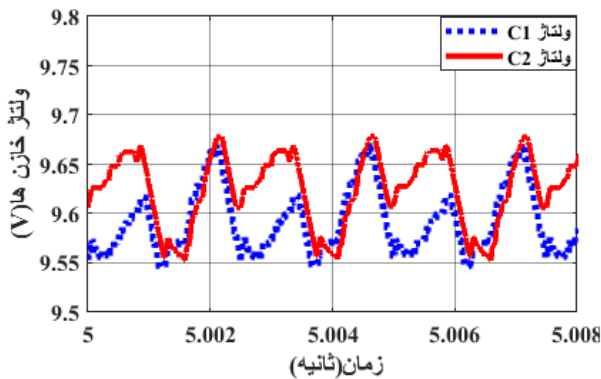
	بار خروجی		
	بار ۱	بار ۲	بار ۳
مقاومت (Ω)	۱۱۵	۱۱۵	۵۷
سلف (mH)	۰	۱۵	۳۰



الف) شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با بار ۱

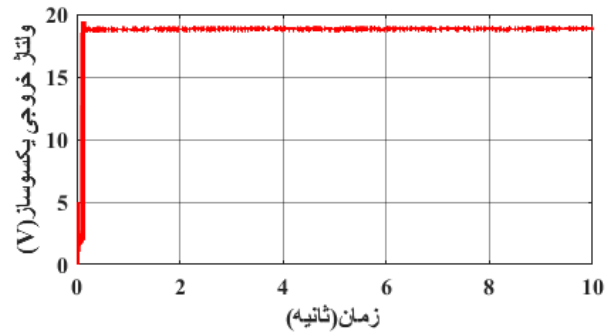


ب) ولتاژ خازن های مبدل

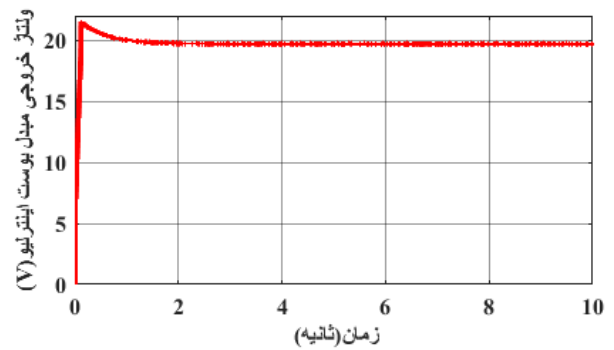


ج) بزرگنمایی ولتاژ خازن های مبدل

شکل ۱۵- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی و تعادل ولتاژ خازن ها با بار ۱

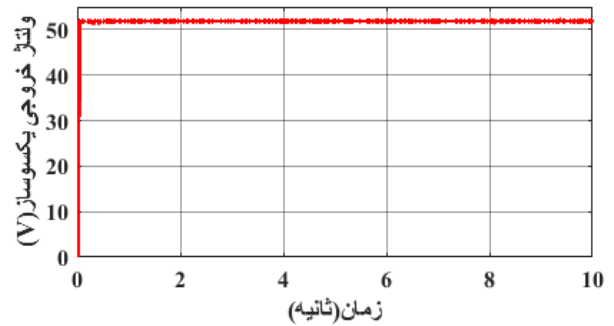


الف) ولتاژ خروجی پس از یکسوسازی ولتاژ ژنراتور ۱

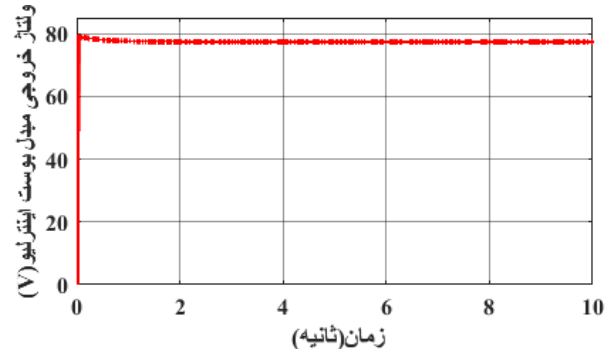


ب) ولتاژ خروجی مبدل افزایشده در هم ژنراتور ۱

شکل ۱۳- شکل موج ولتاژ خروجی یکسوساز و افزایشده در هم ژنراتور ۱



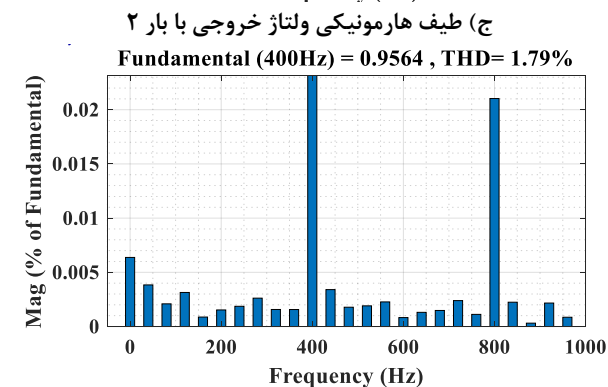
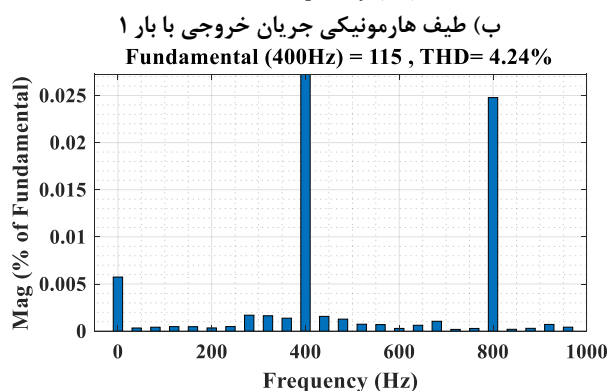
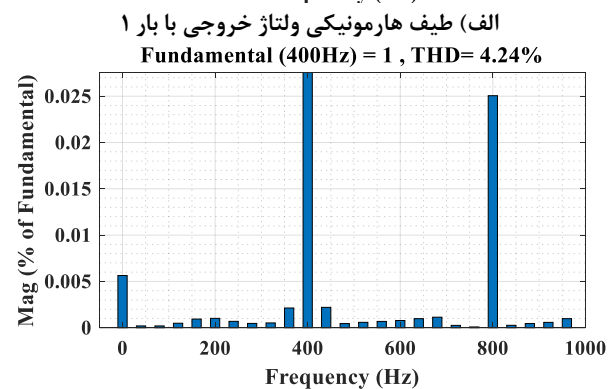
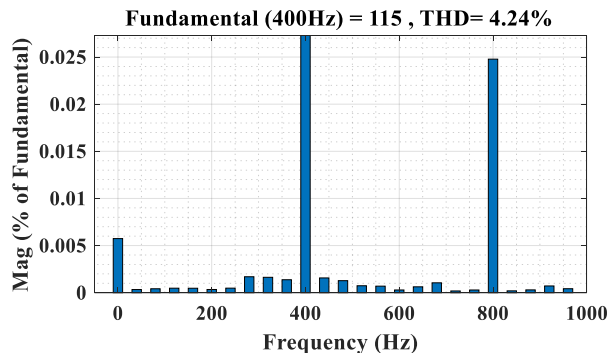
الف) ولتاژ خروجی پس از یکسوسازی ولتاژ ژنراتور ۲



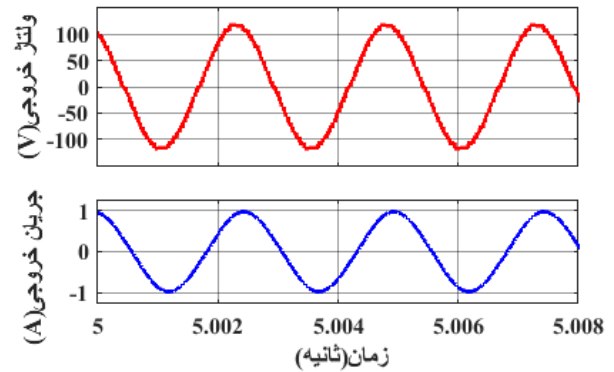
ب) ولتاژ خروجی مبدل افزایشده در هم ژنراتور ۲

شکل ۱۴- شکل موج ولتاژ خروجی یکسوساز و مبدل افزایشده در هم ژنراتور ۲

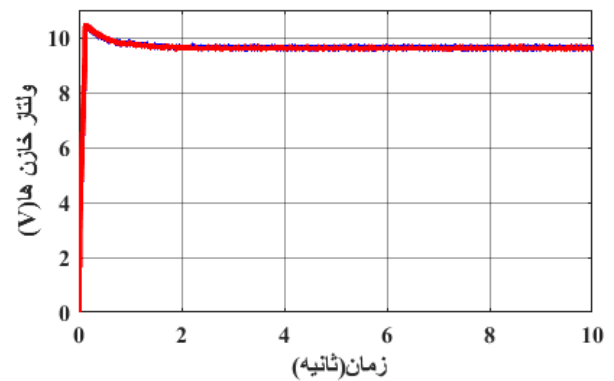
IEEE 519-2022، علاوه بر تایید کیفیت ولتاژ و جریان خروجی، نشانه عدم نیاز به استفاده از فیلتر در خروجی مبدل است.



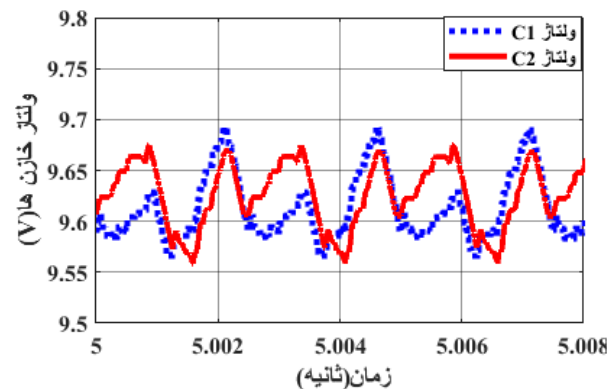
شکل ۱۷- طیف هارمونیک جریان خروجی با بار ۲
شکل ۱۶- طیف هارمونیک ولتاژ و جریان خروجی با بار ۱ و بار ۲



الف) شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با بار ۲



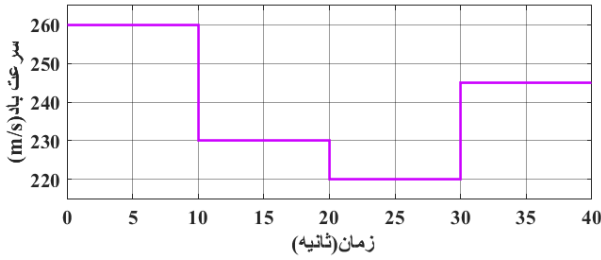
ب) ولتاژ خازن های مبدل



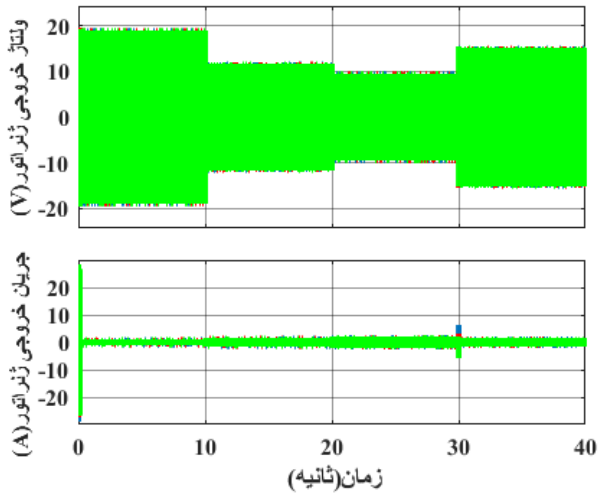
ج) بزرگنمایی ولتاژ خازن های مبدل

شکل ۱۶- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی و تعادل ولتاژ خازن ها با بار ۲

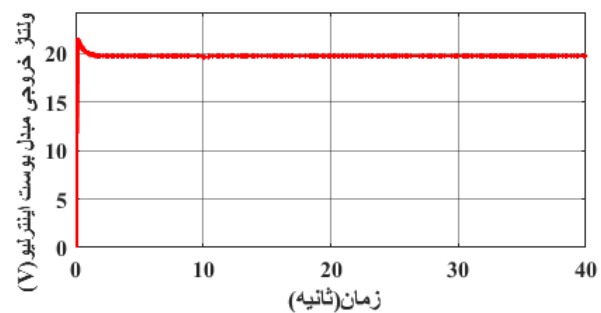
همچنین، شکل ۱۷ طیف هارمونیک ولتاژ و جریان خروجی را نمایش می دهد. مطابق شکل، میزان اعوجاج هارمونیک کل برای جریان خروجی برای بار مقاومتی برابر ۴/۲۴ درصد و برای بار سلفی-مقاومتی ۱/۷۹ می باشد. این مشخصه، برای ولتاژ خروجی در هر دو حالت برابر ۴/۲۴ می باشد. مطابق بودن مقادیر به دست آمده با استاندارد



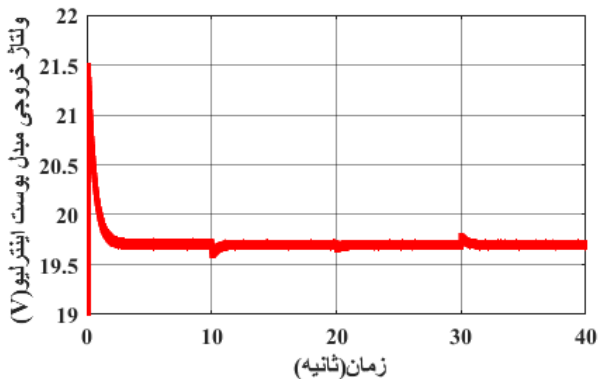
شکل ۱۹- تغییرات سرعت باد



الف) ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور ۱ در هنگام تغییر سرعت باد



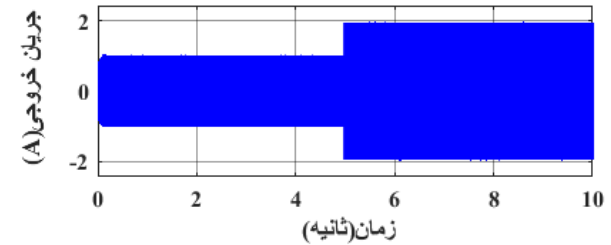
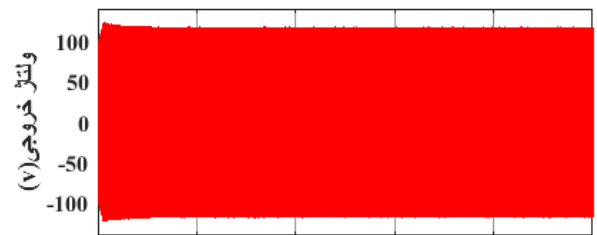
ب) ولتاژ خروجی مبدل افزایشده در هم ژنراتور ۱



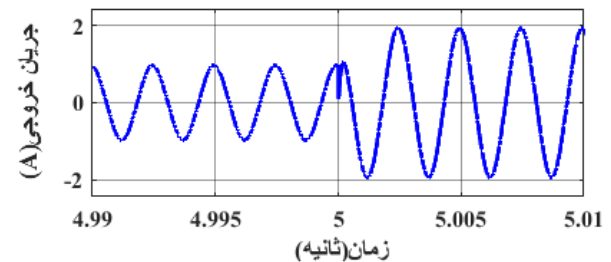
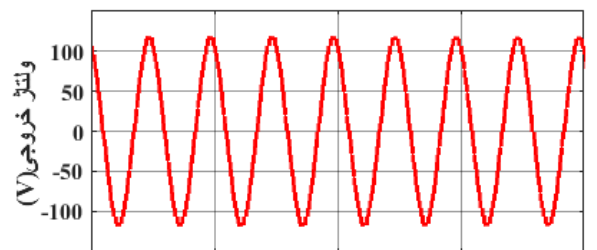
ج) بزرگنمایی ولتاژ خروجی مبدل افزایشده در هم ژنراتور ۱

شکل ۲۰- تغییرات ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور ۱ و مبدل افزایشده در هم متصل به آن در هنگام تغییر سرعت باد

علاوه بر شبیه‌سازی موارد پایه بیان شده، واکنش مبدل نسبت به تغییر ناگهانی بار خروجی مبدل از بار ۲ به بار ۳ در شکل ۱۸ بررسی شده است. از آنجا که سرعت هواپیما و باد متغیر می‌باشد، اثر تغییرات سرعت بر نحوه عملکرد سیستم نیز بررسی شده است. برای نمونه، سرعت باد مطابق شکل ۱۹ به سیستم اعمال شده است. همانطور که در شکل‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲ قابل مشاهده است، تغییر سرعت باد بر عملکرد سیستم تاثیر بسیار کمی دارد که قابل چشم پوشی است. به عبارت دیگر، سیستم کاملا نسبت به تغییر سرعت هواپیما و باد مقاوم می‌باشد.

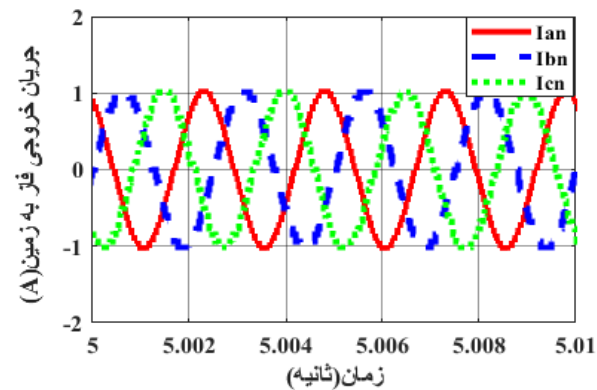
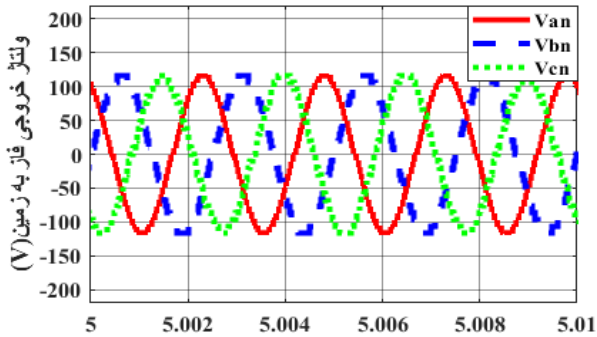


الف) ولتاژ و جریان خروجی در تغییر ناگهانی بار ۲ به بار ۳

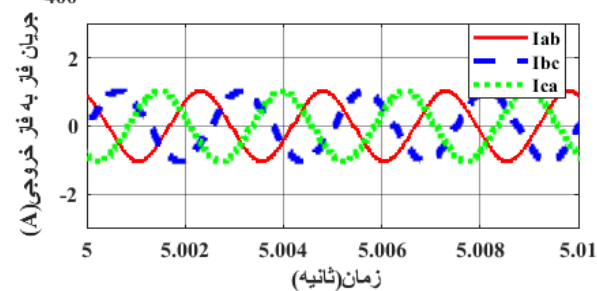
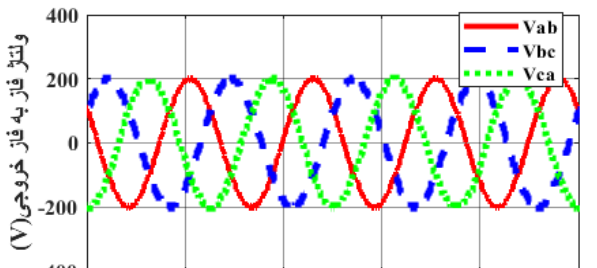


ب) بزرگنمایی ولتاژ و جریان خروجی در تغییر ناگهانی بار ۲ به بار ۳
 شکل ۱۸- ولتاژ و جریان خروجی در حالت تغییر ناگهانی بار خروجی مبدل از بار ۲ به بار ۳

در ادامه، مبدل به صورت سه فاز نیز شبیه‌سازی شده است. شکل ۲۳ ولتاژ و جریان خروجی هر فاز نسبت به زمین و شکل ۲۴ ولتاژ و جریان خروجی هر فاز نسبت به فاز دیگر را با بار ۲ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، عملکرد سیستم همانند حالت تکفاز صحیح می‌باشد.

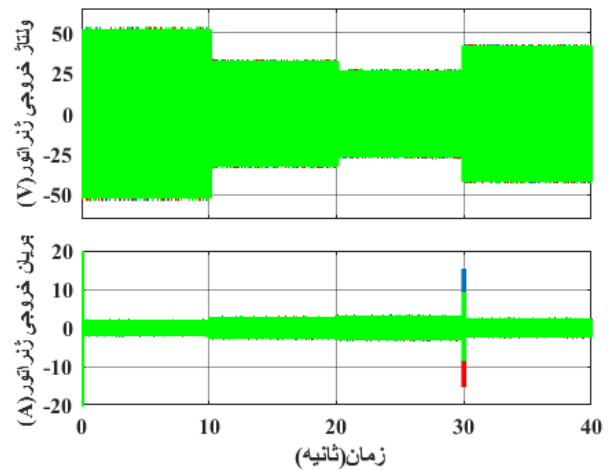


الف) ولتاژ و جریان خروجی فاز به زمین مبدل سه فاز با بار ۲

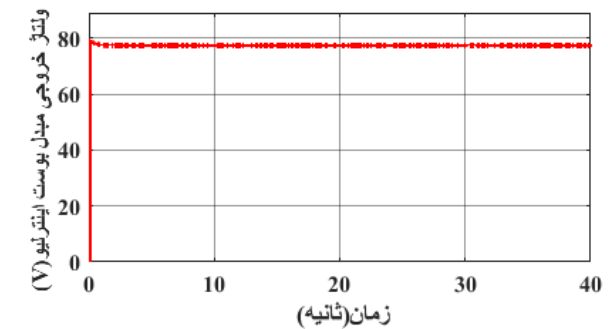


ب) ولتاژ و جریان خروجی فاز به فاز مبدل سه فاز با بار ۲

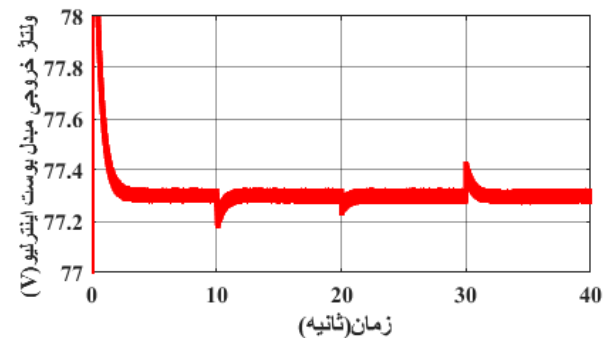
شکل ۲۳- ولتاژ و جریان خروجی فاز به زمین و فاز به فاز مبدل سه فاز با بار ۲



الف) ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور ۲ در هنگام تغییر سرعت باد

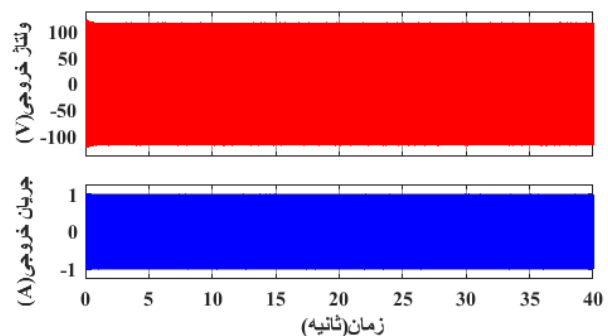


ب) ولتاژ خروجی مبدل افزایشده در هم ژنراتور ۱



ج) بزرگنمایی ولتاژ خروجی مبدل افزایشده در هم ژنراتور ۲

شکل ۲۱- تغییرات ولتاژ و جریان خروجی ژنراتور ۲ و مبدل افزایشده در هم متصل به آن در هنگام تغییر سرعت باد



شکل ۲۲- ولتاژ و جریان خروجی در هنگام تغییر سرعت باد

مقایسه ساختار مبدل پیشنهادی و ساختارهای پیشین

جهت مقایسه‌ی ساختارهای پیشین جدول ۶ ارائه شده است که در آن ویژگی‌های مختلف از جمله تعداد سویچ‌های به کار رفته، تعداد منابع مستقل DC مورد نیاز، مجموع ولتاژ سد سویچ‌ها، تعداد خازن‌ها و میزان افزایش ولتاژ مبدل‌ها بررسی شده است. البته لازم به ذکر است که پارامترهای مبدل‌ها جهت مقایسه بهتر با فرض تولید تعداد سطوح ولتاژ خروجی برابر و یا نزدیک به هم، محاسبه شده است. همانطور که در جدول قابل مشاهده است تعداد سویچ‌های به کار رفته در

مبدل پیشنهادی از همه‌ی ساختارهای دیگر به جز ساختار مبدل SADC کمتر است. از نظر نیاز به منابع مستقل DC، مبدل ارائه شده بعد از مبدل دیود کلمپ بهترین عملکرد را دارد. اگرچه تعداد خازن‌های بسیار کمتری نسبت به مبدل دیود کلمپ دارا می‌باشد. و در نهایت از نظر مجموع ولتاژ سد سویچ‌ها، بعد از ساختار CCS، بهترین ساختار، ساختار پیشنهادی مقاله می‌باشد. همچنین از نظر میزان افزایش ولتاژ، ساختار پیشنهادی از همه‌ی ساختارها به جز ساختار نوع WE، عملکرد بهتری دارد.

جدول ۶- مقایسه ساختار ارائه شده و ساختارهای پیشین

میزان افزایش ولتاژ	مجموع ولتاژ سد	تعداد خازن	تعداد منابع DC	تعداد سویچ	ساختار
۱,۲	۳۴,۵V _{DC}	۲	۲	۱۳	ساختار ارائه شده
۱	۴۸V _{DC}	۰	۱۲	۴۸	مبدل پل H آبشاری
۱	۴۸V _{DC}	۲۴	۱	۴۸	مبدل دیود کلمپ
۱	۵۴V _{DC}	۰	۶	۱۰	مبدل SADC [۱۷]
۱	۶V _{DC}	۱۰	۲	۱۶	مبدل CCS [۱۸]
۱	۶۶V _{DC}	۱۲	۸	۲۰	مبدل جدید [۱۹]
۱	۵۴V _{DC}	۰	۱۲	۲۰	مبدل CIC [۲۰]
۱	۸۰V _{DC}	۰	۱۲	۱۶	مبدل CPCC [۲۱]
۱,۲۵	۴۸V _{DC}	۴	۲	۲۲	مبدل نوع WE [۲۲]
۱	۵۰V _{DC}	۲۳	۱	۱۷	مبدل جدید [۲۳]

نتیجه گیری

امروزه، مبدل‌های چندسطحی در تمامی کاربردها به خصوص کاربردهای هوایی، به دلیل ویژگی‌های مثبتی همانند کاهش فشار ولتاژ بر روی سویچ‌ها، تداخلات الکترومغناطیسی و اعوجاج هارمونیک کل، جایگزین مبدل‌های سنتی دوسطحی شده‌اند. در این راستا، این پژوهش به ارائه ساختار جدید بی‌نیاز به استفاده از فیلتر در خروجی مبدل با قابلیت تولید ولتاژ خروجی ۲۵ سطحی و اعوجاج هارمونیک کل پایین پرداخته- است. مبدل ارائه شده قابلیت استفاده در هر دو حالت اتصال به منبع ثابت، به باس DC هواپیما و اتصال به منبع تغذیه اضطراری هواپیما را دارد. صحت عملکرد ساختار طراحی شده توسط شبیه‌سازی و در حالت اتصال به توربین بادی و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم مورد آزمون قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده، سیستم طراحی شده به کمک مبدل افزایشده در هم و ساختار اصلی ۲۵ سطحی به خوبی ولتاژ و جریان خروجی را تامین نمود. علاوه بر این، سیستم نسبت به تغییر ناگهانی بار و تغییر سرعت باد و هواپیما، مقاومت و پایداری مناسبی از خود نشان داد.

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Hydraulic
- ۲ Pneumatic
- ۳ ElectroMagnetic Interference
- ۴ Total Harmonic Distortion
- ۵ Hybrid-Electric
- ۶ Ducted fans
- ۷ Permanent Magnet Synchronous Generator
- ۸ Interleaved Boost Converter
- ۹ Wind Turbine
- ۱۰ Tip Speed Ratio
- ۱۱ Peak Blocking Voltage
- ۱۲ Total Blocking Voltage
- ۱۳ Nearest Level Modulation
- ۱۴ Efficiency

مراجع

- Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4115–4125, 2010.
- [7] H. Mortazavi, H. Mehrjerdi, M. Saad, S. Lefebvre, D. Asber, and L. Lenoir, “A Monitoring Technique for Reversed Power Flow Detection with High PV Penetration Level,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2221–2232, 2015.
- [8] M. Seyedmahmoudian, S. Mekhilef, R. Rahmani, R. Yusof, and E. T. Renani, “Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems,” *Energies*, vol. 6, no. 1, pp. 128–144, 2013.
- [9] P. Omer, J. Kumar, and B. S. Surjan, “A Review on Reduced Switch Count Multilevel Inverter Topologies,” *IEEE Acces*, vol. 8, pp. 22281–22302, 2020.
- [10] P. Schmollgruber *et al.*, “Multidisciplinary exploration of dragon: An onera hybrid electric distributed propulsion concept,” 2019.
- [11] J. L. Freeman and B. T. Schiltgen, “Eco-150-300 design and performance: A tube-and-wing distributed electric propulsion airliner,” 2019.
- [12] C. N. Wang, W. C. Lin, and X. K. Le, “Modelling of a PMSG wind turbine with autonomous control,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2014, 2014.
- [13] A. Urtasun, P. Sanchis, I. San Martín, J. López, and L. Marroyo, “Modeling of small wind turbines based on PMSG with diode bridge for sensorless maximum power tracking,” *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 138–149, 2013.
- [14] M. Hassani, E. Azimi, A. Khodaparast, J. Adabi, and E. Pouresmaeil, “Fault-Tolerant Operation Strategy for Reliability Improvement of a Switched-Capacitor Multilevel Inverter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 10, pp. 9916–9926, 2022.
- [15] A. J. Davison, I. D. Reid, N. D. Molton, and O. Stasse, “MonoSLAM: Real-time single camera SLAM,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2007.
- [1] M. T. Fard, J. He, H. Huang, and Y. Cao, “Aircraft Distributed Electric Propulsion Technologies - A Review,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 8, no. 4, pp. 4067–4090, 2022.
- [2] J. John and J. Jose, “A three phase step up multilevel inverter for aircraft applications,” in *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, 2016, pp. 405–408.
- [3] A. Syukri Mohamad and N. Mariun, “Simulation of a 115V, 400Hz aircraft inverter based on cascaded multilevel inverter topology,” *Int. Rev. Model. Simulations*, vol. 5, no. 1, pp. 164–170, 2012.
- [4] V. Patel, C. Buccella, and C. Cecati, “Analysis and implementation of multilevel inverter for full electric aircraft drives,” *Energies*, vol. 13, no. 22, 2020.
- [5] V. Biagini, P. Zanchetta, M. Odavic, M. Sumner, and M. Degano, “Control and modulation of a multilevel active filtering solution for variable-speed constant-frequency more-electric aircraft grids,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 600–608, 2013.
- [6] C. Cecati, F. Ciancetta, and P. Siano, “A multilevel inverter for photovoltaic systems with fuzzy logic control,” *IEEE*

- [21] A. Khoshkbar Sadigh, M. Abarzadeh, K. A. Corzine, and V. Dargahi, "A New Breed of Optimized Symmetrical and Asymmetrical Cascaded Multilevel Power Converters," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 1160–1170, 2015.
- [22] M. Ali, M. Tariq, R. K. Chakraborty, M. J. Ryan, B. Alamri, and M. A. Bou-Rabee, "11-Level Operation with Voltage-Balance Control of WE-Type Inverter Using Conventional and DE-SHE Techniques," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64317–64330, 2021.
- [23] A. Priyadarshi, P. K. Kar, and S. B. Karanki, "A Single Source Transformer-Less Boost Multilevel Inverter Topology with Self-Voltage Balancing," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 3954–3965, 2020.
- [16] E. Azimi *et al.*, "X-type step-up multilevel inverter with reduced component count based on switched-capacitor concept," *Electron.*, vol. 9, no. 12, pp. 1–18, 2020.
- [17] M. Saeedian, J. Adabi, and S. M. Hosseini, "Cascaded multilevel inverter based on symmetric-asymmetric DC sources with reduced number of components," *IET Power Electron.*, vol. 10, no. 12, pp. 1468–1478, 2017.
- [18] R. Agrawal and S. Jain, "Multilevel inverter for interfacing renewable energy sources with low/medium- and highvoltage grids," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 14, pp. 1822–1831, 2017.
- [19] C. H. Hsieh, T. J. Liang, S. M. Chen, and S. W. Tsai, "Design and Implementation of a Novel Multilevel DC-AC Inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 3, pp. 2436–2443, 2016.
- [20] M. R. J. Oskuee, M. Karimi, S. N. Ravadanegh, and G. B. Gharehpetian, "An Innovative Scheme of Symmetric Multilevel Voltage Source Inverter with Lower Number of Circuit Devices," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, pp. 6965–6973, 2015.