



Design and simulation of multi-layer GPS antenna with tapered balun feeding with circular polarization and special radiation pattern in order to reduce interference effects

H.Heidarifard¹, M. Fallah^{2*}, B. Abbasi Arend³

* Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

(Received: 2024/04/07 revised: 2024/09/18 Accepted:2024/10/09 published: 2024/11/06)

Abstract

The inherent limitations of prism-based surface plasmon resonance (SPR) biosensors, primarily due to their bulky design and dependence on mechanical components, have constrained their deployment in field and operational applications. In light of these challenges, there has been a significant advancement in the development of fiber optic-based SPR biosensors. This paper presents the design of a highly sensitive SPR biosensor utilizing a dual-core photonic crystal fiber (PCF). In this configuration, a gold layer serves as the plasmonic material, enabling the investigation of refractive index variations in the medium surrounding the PCF structure. Surface plasmons are excited through the coupling of the leakage mode of the PCF with the plasmonic mode. Additionally, a thin layer of titanium dioxide (TiO₂) is applied over the gold to prevent oxidation. According to simulations conducted using the Finite element method (FEM) method, the biosensor demonstrates the sensitivity of 7000 nm/RIU in terms of wavelength sensitivity and 380 RIU⁻¹ in terms of amplitude sensitivity, confirming the designed device's applicability in drug detection, biological sensing, and other analytical scenarios.

Keywords: Surface plasmon resonance, Biosensor, Amplitude sensitivity; PCF, Wavelength sensitivity

Cite this article: H.Heidarifard, M. Fallah, B. Abbasi Arend, "Design and Simulation of an Ultra-Sensitive Biosensor Based on" *Applied Electromagnetics* , vol.12 , no.2 , pp.29-38 . <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.4.4>



© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: mohsenfallah1347@gmail.com

علمی - پژوهشی

طراحی و شبیه‌سازی آنتن GPS چندلایه با تغذیه بالن باریک شونده و قطبش دایروی و الگوی تشعشی ویژه به منظور کاهش اثرات تداخل

حمیده حیدری فرد^۱، محسن فلاح^{۲*}، بیژن عباسی آرند^۳

۱- دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران ۳- دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶)

چکیده

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی یک آنتن تک تغذیه با قطبش دایره ای راست‌گرد، قابل استفاده در کاربردهای GPS، ارائه شده است. اما ویژگی اصلی و وجه تمایز این آنتن از سایر آنتن‌های تک تغذیه با پلاریزاسیون دایروی مورد استفاده در دستگاه‌های GPS این است که به دلیل به حداقل رساندن تلفات چندمسیری، این مقاله ساختاری را معرفی می‌کند که نسبت بهره در زاویه $\theta=0$ نسبت به بهره در زاویه حوالی $\theta=90$ حداقل به 20 dB برسد. برای دستیابی به این اهداف، یک آنتن چندلایه در بالای سطح زمین پیشنهاد شده است. لایه اول از یک صفحه فلزی با دو گوشه برش خورده و یک شکاف بیضی شکل در وسط تشکیل شده است. لایه بعدی یک آنتن سیمی حلقه‌ای است که شامل دو حلقه مستطیل شکل است و لایه آخر یک فرا سطح است که بر روی هر سلول شکاف‌هایی دارد تا ویژگی‌های تشعشی و خلوص پلاریزاسیون بهتری داشته باشد. یک بالن باریک شونده نیز برای تغذیه آنتن، طراحی و شبیه‌سازی شده است. نتایج به دست آمده و نمودارهای تشعشی نشان می‌دهد که این طراحی توانسته است نسبت محوری کمتر از 3 dB در بازه‌ی فرکانسی 1.57 GHz تا 1.61 GHz داشته باشد. همچنین در این بازه‌ی فرکانسی، اختلاف مقادیر حداکثر بهره (که در $\theta=0$ رخ می‌دهد) در مقایسه با بهره در حوالی زاویه‌ی $\theta=90$ ، حداقل 20 dB هست. همچنین در بازه‌ی فرکانسی مذکور، مقادیر S_{11} کمتر از -10 dB و مقادیر VSWR کمتر از 2 است.

کلیدواژه‌ها: آنتن سیمی، آنتن حلقه‌ای، بالن تغذیه باریک شونده، قطبش دایروی، آنتن GPS

۱- مقدمه

تمام الکترونیک (AEA^۱) شد [۲]. در هواپیماهای معمولی، اعم از نظامی یا غیرنظامی، سیستم پیش‌ران‌ش دارای معماری پیچیده‌ای است و پیش‌ران‌ش توسط شبکه‌های توزیع قدرت پیچیده داخلی و با سیستم پشتیبان^۲ مناسب انجام می‌شود. علاوه بر این، تعاملات بین تجهیزات مختلف در سیستم قدرت هواپیما باعث کاهش کارایی کل سیستم می‌شود. به منظور کاهش پیچیدگی، بهبود کارایی و قابلیت اطمینان، تولیدکنندگان هواپیما تأکید بیشتری بر استفاده از فناوری‌هایی دارند که هزینه‌های کلی و مصرف سوخت را کاهش

امروزه، با توسعه فناوری الکترونیک قدرت در هوافضا، انرژی الکترونیک با توجه به مزایایی همچون انعطاف‌پذیری، سهولت کاربرد، بازدهی بیشتر و وزن کمتر به تدریج جایگزین انرژی مکانیکی (یا هیدرولیکی و نیوماتیکی) شده است [۱]. بنابراین، مزایای انرژی الکترونیک منجر به تغییر ساختار هواپیماهای معمولی و ایجاد ساختارهایی جدید با عنوان هواپیماهای نیمه الکترونیک (MEA^۱) یا

^۲ All Electric Aircraft

^۳ Redundancy System

^۱ More Electric Aircraft

استاد: حیدری فرد، حمیده، فلاح، محسن، عباسی آرند، بیژن، "طراحی و شبیه‌سازی آنتن GPS چندلایه با تغذیه بالن باریک شونده و قطبش دایروی و الگوی تشعشی"، الکترومغناطیس کاربردی، ۱۲ (۲)، ۳۸-۲۹، ۱۴۰۳، <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.4.4>

سنکرون روتور سیم‌پیچی شده بدون جاروبک [۱۶-۱۴] و ... است. ساختار ساده و مستحکم، عدم وجود جاروبک، هزینه نگهداری کم و قابلیت اضافه بار مناسب از ویژگی‌های ماشین القایی قفسه سنجایی است. باین حال به واسطه عدم دسترسی به روتور، تنظیم تحریک دشوار بوده و عملکرد آن وابسته به تغییرات بار و سرعت است. همچنین ماشین القایی دارای گشتاور راه اندازی کمی است و این موضوع باعث کاهش قابلیت اطمینان آن در لحظه راه‌اندازی می‌گردد. ماشین‌های سنکرون روتور سیم-پیچی شده بدون جاروبک، به طور گسترده به عنوان ژنراتور در هواپیماهای معمولی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری، قابلیت اطمینان بالا، تولید انرژی الکتریکی در محدوده وسیعی از تغییرات سرعت، کنترل پذیری مناسب و حساسیت کمتر نسبت به اضافه بار کوتاه مدت، از مزایای این ماشین‌ها است.

با توسعه فناوری و گسترش کاربرد مواد آهن‌ربای دائم خاکی کمیاب و مبدل‌های الکترونیک قدرت با تحمل درجه حرارت بالا، ظرفیت استفاده از ماشین‌های الکتریکی آهن‌ربای دائم در هواپیما به تدریج بیشتر شده است [۱]. کاهش قیمت آهن‌رباها، همراه با بهبود چشمگیر در عملکردشان، چندین تحول جدید را در خانواده ماشین‌های آهن‌ربای دائم ایجاد کرده است [۵]. مزیت اصلی این ماشین‌ها عدم وجود سیم‌بندی در روتور است که منجر به کاهش تلفات مسی و وزن ماشین شده و لذا چگالی توان و راندمان آن بهبود می‌یابد. حداکثر گشتاور این ماشین‌ها در سرعت صفر نیز قابل دست‌یابی است که البته به واسطه توان نامی مبدل‌های الکترونیک قدرت، محدودیت‌های حرارتی و مغناطیسی زدایی آهن‌ربا محدود می‌گردد. همچنین ماشین‌های آهن‌ربای دائم با توجه به قابلیت عملکرد در ناحیه تضعیف شار، محدوده عملیاتی بیشتری دارند [۵]. با توجه به ویژگی‌های فوق در این مقاله یک راه‌انداز-ژنراتور از نوع سنکرون آهن‌ربای دائم با توان نامی ۶ کیلووات و گشتاور راه‌اندازی ۵۳ نیوتن‌متر برای کاربردهای هوایی طراحی شده است. این مشخصات مربوط به یک راه‌انداز-ژنراتور جریان مستقیم است که در بالگرد و هواپیماهای کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بخش ۲ ضمن تشریح ملزومات طراحی راه‌انداز-ژنراتور، روابط طراحی بخش‌های مختلف بیان شده و بر اساس آن یک راه‌انداز-ژنراتور با مشخصات مذکور طراحی شده است. سپس در بخش ۳ عملکرد الکترومغناطیسی ماشین مورد نظر با استفاده از روش اجزاء محدود تحلیل و بررسی شده و نتایج تحلیل حرارتی در بخش ۴ بیان شده است. در پایان نتایج حاصل از این پژوهش در بخش ۵ ذکر شده است.

۲- طراحی راه‌انداز-ژنراتور سنکرون آهن‌ربای دائم

در کاربردهای هوافضا کاهش وزن و حجم از جمله اهداف اصلی است که خود کاهش مصرف سوخت، افزایش طول مسیر حرکت

دهند. علاوه، قوانین زیست محیطی با توجه به تغییرات اقلیمی در آینده، تغییر اساسی در کل ساختار هواپیما را اجتناب‌ناپذیر می‌کند، زیرا برای دستیابی به این اهداف، بهینه‌سازی زیرسیستم‌ها و اجزای فعلی هواپیما به تنهایی کافی نیست [۳]. با توجه به توضیحات فوق منظور از هواپیما نیمه الکتریکی، استفاده بیشتر از انرژی الکتریکی برای تأمین توان مورد نیاز (به جز پیش‌رانه) در سیستم قدرت هواپیماست. مفهوم MEA مبتنی بر استفاده از توان الکتریکی برای تغذیه سیستم‌های فرعی (زیرسیستم‌ها) هواپیما است. لازم به ذکر است، غالباً سیستم‌های فرعی توسط ترکیبی از توان‌های هیدرولیکی، الکتریکی، پنوماتیکی^۱ و مکانیکی تأمین می‌شوند [۱]. از سوی دیگر در سیستم‌های حمل‌ونقل پیشرفته، کاهش تعداد قطعات (و به دنبال آن کاهش وزن) منجر به افزایش راندمان و مسافت قابل پیمایش، کاهش مصرف انرژی و نیز افزایش قابلیت اطمینان خواهد شد. در این راستا موتور الکتریکی که به منظور راه‌اندازی به کار می‌رود، با دینام الکتریکی ادغام شده و در قالب یک ماشین الکتریکی به نام راه‌انداز-ژنراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴-۵]. بنابراین راه‌انداز-ژنراتور دو وظیفه را هم‌زمان انجام می‌دهد: راه‌اندازی موتور در هواپیما یا خودرو و سپس تأمین بارهای الکتریکی پس از راه‌اندازی. این کار حجم و وزن را کاهش داده و در نتیجه چگالی توان را افزایش می‌دهد [۶-۵]. سیستم راه‌انداز-ژنراتور باید به گونه‌ای طراحی شود که قابلیت انتقال توان در دو جهت را داشته باشد. بر این اساس دو حالت عملکردی برای آن در نظر گرفته می‌شود [۵]:

۱- حالت راه‌انداز (starter): در این حالت راه‌انداز-ژنراتور در حالت موتوری کار کرده و پیش‌رانه هواپیما را به سرعت مطمئن راه اندازی می‌رساند.

۲- حالت ژنراتوری (Generating): در این حالت پیش‌رانه پس از راه‌اندازی به عنوان محرک ژنراتور عمل می‌نماید. با توجه به ماهیت سرعت متغیر پیش‌رانه، یک مبدل الکترونیک قدرت ولتاژ خروجی ژنراتور را تثبیت کرده و ولتاژ dc لازم برای تغذیه بارهای الکتریکی سیستم را فراهم می‌کند. در طراحی راه‌انداز-ژنراتور، افزایش ظرفیت توان، کاهش وزن و حجم از جمله اهداف اصلی است [۷]. در دستیابی به این اهداف، از ماشین‌های الکتریکی با چگالی توان بالا استفاده می‌شود. در حال حاضر چگالی توان ماشین‌های الکتریکی متداول در حوزه پرنده‌های الکتریکی در حدود $3/5 \text{ kW/kg}$ است و اخیراً ماشین‌هایی با چگالی 5 kW/kg نیز توسط شرکت‌هایی مانند زیمنس طراحی و تولید شده است [۸].

راه‌انداز-ژنراتور دارای ساختارهای مختلفی از جمله القایی [۹]، سوئیچ رلوکتانس [۱۱-۹]، سنکرون آهن‌ربای دائم [۱۳-۱۲]،

¹ Pneumatic

۲-۱. ابعاد ماشین و نوع سیم بندی استاتور

ماشین سنکرون آهن‌ربای دائم را می‌توان بر مبنای توان و یا گشتاور مورد انتظار طراحی نمود. طراحی بر پایه توان، نیازمند پارامترهای اولیه زیادی است. از سوی دیگر، در طراحی راه‌انداز-ژنراتور برای تحقق گشتاور موردنیاز حالت راه‌اندازی، بهتر است طراحی بر پایه گشتاور صورت گیرد. معادله طراحی بر اساس گشتاور به شرح زیر است [۱۷].

$$T = kD^2L \quad (1)$$

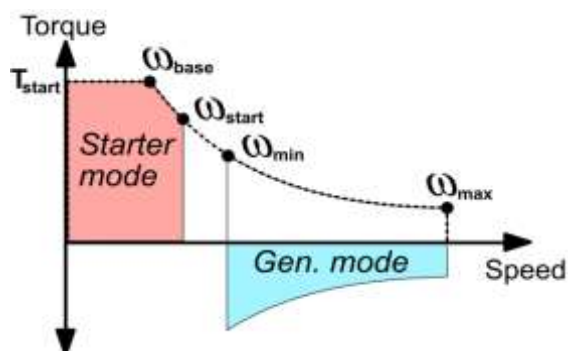
در این رابطه D قطر داخلی استاتور، L طول ناخالص استاتور و k حاصل ضرب بارگذاری الکتریکی و مغناطیسی است که بر اساس نوع کلاس کاری ماشین انتخاب می‌گردد. k برای کاربردهای هوافضا بین ۳۰۰۰ تا ۷۵۰۰۰ نیوتن‌متر بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. با انتخاب مقادیر مناسب برای گشتاور و ضریب k ، می‌توان قطر و طول ماشین را محاسبه نمود. برای جداسازی D و L در ماشین سنکرون آهن‌ربای دائم می‌توان از نسبت طول به قطر استفاده نمود که این نسبت عددی بین ۱ تا ۳ انتخاب می‌شود [۱۸]. گشتاور لازم در شرایط راه‌اندازی عبارت است از:

$$T_{start} = \frac{P_m}{\omega_{start}} = \frac{25000}{4500 \times \pi/30} = 53.05 \text{ N.m} \quad (2)$$

با انتخاب مقدار ۵۰۰۰۰ برای ضریب k و ۱/۲۵ برای نسبت طول به قطر، L و D بر مبنای رابطه (۱) به ترتیب ۱۲۰ و ۹۶ میلی‌متر محاسبه می‌گردند.

معمولاً برای طراحی شیار، شیارهای باریک نیمه بسته استفاده می‌شود. زیرا فاصله بین دندان‌های مجاور در دهانه شیار کمتر بوده و لذا فاصله‌ی هوایی و در نتیجه ضربه‌ی شار کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، شیارهای نوک‌تیز مخروطی شکل برای چگالی شار معینی از دندان، حداکثر مساحت شیار را نتیجه می‌دهد. با انتخاب تعداد بالای شیار، میزان عایق‌کاری در سیم‌پیچ‌ها بیشتر می‌شود، ولی مقدار راکتانس نشتی شیار کاهش می‌یابد. همچنین تعداد کم شیار نیز باعث افزایش راکتانس نشتی خواهد شد [۱۹]. با توجه به نکات فوق در این طراحی ساختار ۱۵ شیار ۱۰ قطب انتخاب شده است. برای سیم‌بندی نیز با توجه به ملاحظات هارمونیک، سیم‌بندی دولایه با گام کسری مدنظر قرار گرفته که سیم‌بندی آن مطابق شکل (۲) است. با توجه به این شکل گام کلاف برابر ۱۲۰ درجه است. اگر نیروی محرکه الکتریکی هر فاز استاتور (رابطه (۳)) را ۹۰ تا ۹۵ درصد ولتاژ نامی فاز در نظر

و نیز افزایش قابلیت اطمینان را به دنبال دارد. بر این اساس، ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده در این کاربردها باید با چگالی توان بالا طراحی شوند. از سوی دیگر راه‌انداز-ژنراتور در حالت موتور و وظیفه تأمین گشتاور موردنیاز برای راه‌اندازی موتور پیشرانه و در حالت ژنراتوری وظیفه تأمین بارهای الکتریکی هواپیما را بر عهده دارد. شکل (۱) مشخصه گشتاور-سرعت مربوط به این کاربرد را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، راه‌انداز-ژنراتور از سرعت صفر تا سرعت ω_{base} ، گشتاوری ثابت برای راه‌اندازی موتور هواپیما تولید می‌کند. از سرعت ω_{base} تا ω_{start} از گشتاور راه‌اندازی با شیب کمی کاسته شده و در ادامه از سرعت ω_{start} تا ω_{min} ماشین الکتریکی در حالت بی‌باری است (یعنی بار الکتریکی به راه‌انداز/ژنراتور متصل نیست) تا اینکه در بازه سرعت ω_{min} تا ω_{max} در حالت ژنراتوری عمل کرده و بارهای الکتریکی هواپیما با ولتاژی ثابت تغذیه می‌گردند.



شکل (۱). مشخصه گشتاور-سرعت سیستم راه‌انداز-ژنراتور [۴]

جدول (۱). مشخصات راه‌انداز-ژنراتور نمونه برای طراحی

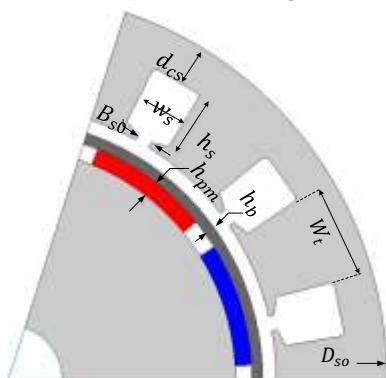
پارامتر	حالت موتوری	حالت ژنراتوری
ولتاژ (ولت)	۱۹۰	۱۹۰
توان خروجی (کیلووات)	۲۵	۶
سرعت (دور بر دقیقه)	۴۵۰۰	۶۰۰۰-۱۲۰۰۰

مشخصات ماشین موردنظر جهت طراحی در جدول (۱) آمده است. مقادیر توان و سرعت مربوط به یک راه‌انداز-ژنراتور واقعی از نوع جریان مستقیم است که در بالگرد و هواپیماهای کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد و میزان ولتاژ با توجه به سطوح ولتاژ dc در هواپیما انتخاب شده است.

شیار (A_{SS}) را محاسبه نمود. ضریب پرشدگی شیار با توجه به نحوه سیم‌بندی بین ۰/۴ تا ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود که در اینجا ۰/۵ منظور شده و لذا مساحت شیار مطابق رابطه زیر ۹۸ میلی‌متر مربع به دست می‌آید که در آن تعداد هادی در هر شیار و γ_s ضریب پرشدگی شیار است.

$$A_{SS} = \frac{Z_s a_s}{\gamma_s} = \frac{14 \times 3.5}{0.5} = 98 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

بر این اساس، می‌توان ابعاد شیار را مشخص کرد. نکته حائز اهمیت برای تعیین ارتفاع شیار آن است که نباید شیارها به قدری عمیق انتخاب شوند که موجب افزایش نشتی شار گردند. اما به‌طور کلی، نسبت عمق به پهنای شیار در محدوده ۳ الی ۶ است. همچنین شیارهای طراحی شده باید به‌گونه‌ای باشند که حداکثر چگالی شار در دندانها برابر با مقدار ۱/۸ تسلا و در هسته برابر با ۱/۵ تسلا باشد. در شکل (۳)، نمایی از استاتور و روتور همراه با ابعاد هر قسمت نشان داده شده است. در این شکل، D_{SO} قطر خارجی استاتور، W_t عرض دندان، h_b ضخامت فیبر کربن، h_{pm} ضخامت آهن‌ربا، h_s ارتفاع شیار، W_s عرض شیار، B_{SO} عرض دهانه شیار و d_{CS} عمق یوغ استاتور است. با توجه به مقادیر چگالی شار در دندانها و هسته، مقادیر کمیت‌های فوق مطابق جدول (۲) محاسبه می‌شوند.



شکل (۳). نمایش قطعی از استاتور و روتور

جدول (۲). ابعاد شیارهای استاتور

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
W_t (mm)	۱۷/۴	h_s (mm)	۱۰
B_{SO} (mm)	۲/۷	d_{CS} (mm)	۴/۵
W_s (mm)	۹/۴۵	D_{SO} (mm)	۱۴۴

طول فاصله هوایی تأثیر بسزایی در مشخصات یک ماشین الکتریکی دارد. در ماشین‌های سنکرون، حداقل طول فاصله هوایی از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\delta \geq \gamma \tau_p \frac{A_a}{B_{av}} \quad (8)$$

که در آن δ طول فاصله هوایی، γ ضریب فاصله هوایی و A_a بارگذاری الکتریکی است. در ماشین سنکرون قطب صاف معادل 3×10^{-7} در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. بدین ترتیب، حداقل طول فاصله هوایی برابر ۰/۳۳ میلی‌متر به دست می‌آید که با

بگیریم، با محاسبه شار توزیع شده و ضریب سیم‌پیچی می‌توان تعداد دور سیم‌پیچ هر فاز را تعیین نمود.

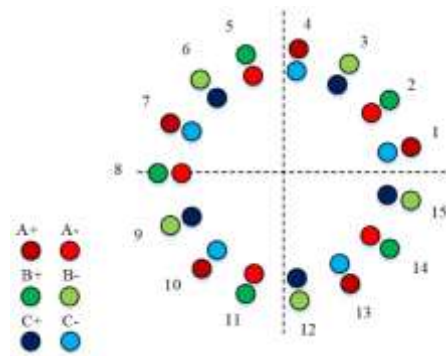
$$E = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot \phi \cdot K_w \quad (3)$$

در رابطه (۳)، E ولتاژ القایی در هر فاز استاتور، f فرکانس کاری ماشین، N تعداد دور در هر فاز استاتور، ϕ شار توزیع شده و K_w ضریب سیم‌پیچی است که برای ساختار سیم‌بندی فوق مطابق رابطه (۴) برابر ۰/۸۶۶ است.

$$K_w = \frac{|1 \angle 0 - 1 \angle 120|}{2} = 0.866 \quad (4)$$

همچنین با فرض توزیع سینوسی شار، ϕ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi = B_{av} \cdot \tau_p \cdot L_i \quad (5)$$



شکل (۲). سیم‌بندی استاتور

در این رابطه، B_{av} چگالی شار متوسط فاصله هوایی، τ_p گام قطبی و L_i طول مؤثر ماشین (معادل حاصل ضرب ضریب فشردگی و طول ماشین) است. ضریب فشردگی برای ورق هسته با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر برابر با ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. با عنایت به بازه تغییرات سرعت راه‌انداز-ژنراتور، برای طراحی سرعت مینا را ۶۰۰ rpm در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب تعداد دور سیم‌پیچ هر فاز استاتور برابر ۳۵ دور محاسبه می‌شود و لذا تعداد ۱۴ هادی در هر شیار استاتور قرار می‌گیرد که با توجه به توان و ولتاژ ماشین و نیز انتخاب چگالی جریان مناسب، سطح مقطع هر هادی مشخص خواهد شد.

چگالی جریان با توجه به نوع خنک کاری در ماشین انتخاب می‌شود که معمولاً برای خنک‌سازی با هوای طبیعی بین ۳ تا ۵ و برای خنک‌سازی اجباری بین ۷ تا ۱۰ $[\frac{A}{mm^2}]$ در نظر گرفته می‌شود. در اینجا با وجود خنک‌سازی اجباری، با توجه به شرایط راه‌اندازی این مقدار برابر ۶/۵ $[\frac{A}{mm^2}]$ انتخاب شده است. بدین ترتیب سطح مقطع هر هادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$a_s = \frac{S}{\sqrt{3} \delta_s} = \frac{7500}{\sqrt{3} \times 190 \times 6.5} = 3.5 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

در رابطه فوق ضریب توان بار ۰/۸ در نظر گرفته شده است. در ادامه با لحاظ نمودن ضریب پرشدگی شیار می‌توان مساحت

آهن‌ربا است که به معنی اختلاف شعاع قوس آهن‌ربا و شعاع خارجی روتور است. انتخاب مناسب این پارامتر، منجر به سینوسی‌تر شدن ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های استاتور می‌شود. در این طراحی ضخامت آهن‌ربا برابر با $2/9$ میلی‌متر، پهنای زاویه‌ای برابر با $0/8$ و طول آهن‌ربا 120 میلی‌متر (برابر با طول استاتور) انتخاب گردیده است. همچنین به واسطه طراحی بر مبنای آهن‌رباهای قابل دسترس، مقدار آفست آهن‌ربا صفر لحاظ شده است.

عامل دیگری که در کاهش هارمونیک‌های نیروی محرکه الکتریکی به ویژه هارمونیک‌های مرتبه ۵ و ۷ و نیز کاهش گشتاور دندانه‌ای (گشتاور ناشی از تعامل بین میدان آهن‌ربا و شیارهای استاتور) نقش دارد، مورب نمودن شیارهای استاتور و یا آهن-رباهای روتور است [۲۲-۲۳]. مورب کردن می‌تواند در طول شیارهای استاتور و یا طول آهن‌رباهای روتور اعمال شود که در اینجا در شیارهای استاتور منظور شده است. این پارامتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\alpha_{TC} = \frac{2\pi}{Q \cdot n_p} \quad (11)$$

که α_{TC} زاویه انحراف و n_p تعداد دوره‌های شکل موج گشتاور دندانه در طول چرخش یک گام شیار مطابق زیر می‌باشد.

$$n_p = \frac{p}{GCD(Q, p)} \quad (12)$$

که $GCD(Q, p)$ بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک (ب. م. م.) بین تعداد قطب‌ها و تعداد شیارهاست.

ماشین سنکرون آهن‌ربای دائم از نوع مغناطیس سطحی، نسبت به مغناطیس داخلی استحکام مکانیکی کمتری دارد و این مسئله در سرعت‌های بالا از حساسیت بیشتر برخوردار است. لذا در طراحی راه‌انداز-ژنراتور به منظور افزایش استحکام مکانیکی لایه‌ای از فیبر کربن به ضخامت یک میلی‌متر بر روی آهن‌ربا قرار داده شده است. این ضخامت بر اساس شعاع روتور، ضخامت آهن-ربا و همچنین بیشینه سرعت ماشین تعیین می‌شود. با توجه به توضیحات فوق ابعاد اصلی راه‌انداز-ژنراتور مورد مطالعه محاسبه و در جدول (۴) ذکر شده است.

۳- تحلیل عملکرد الکترومغناطیسی

در این بخش راه‌انداز-ژنراتور طراحی شده در بخش قبل با استفاده از نرم‌افزار ماکسول و به روش اجزاء محدود دوبعدی مدل‌سازی و تحلیل می‌شود. عملکرد ماشین در سه حالت موتور، بی‌باری و ژنراتوری بررسی شده و کمیت‌های

توجه به ملاحظات فنی $1/5$ میلی‌متر در نظر می‌گیریم. با تعیین فاصله هوایی ماشین می‌توان قطر خارجی روتور (D_{ro}) را محاسبه نمود که از رابطه (۹)، محاسبه می‌شود.

$$D_{ro} = D - 2\delta \quad (9)$$

۲-۲. طراحی آهن‌ربا

با توجه به ویژگی‌های مثبت آهن‌رباهای نوع نئودیمیوم و ساماریوم-کبالت، در طراحی ماشین‌های الکتریکی با کارایی بالا معمولاً از این آهن‌رباها استفاده می‌شود. آهن‌ربای نئودیمیوم دارای حاصل ضرب انرژی بالاتر و قیمت کمتری است، اما نوع ساماریوم-کبالت در دماهای بالا عملکرد بهتری داشته و ضریب مغناطیس زدایی حرارتی آن کمتر است. همچنین مقاومت آن در برابر خوردگی بالا است و لذا برای کاربردهای هوافضا بسیار مناسب است.

بر این اساس، در طراحی راه‌انداز-ژنراتور مورد مطالعه از آهن‌ربای نوع ساماریوم-کبالت استفاده شده که مشخصات آن در جدول ۳ آمده است.

جدول (۳). مشخصات آهن‌ربای ساماریوم کبالت [۱۷]

B_r	H_c	μ_r	T_c
T0/۸۲-۱/۱۶	MA/m۱/۵۹ - kA/m۴۹۳	۱/۰۵	C۸۰۰

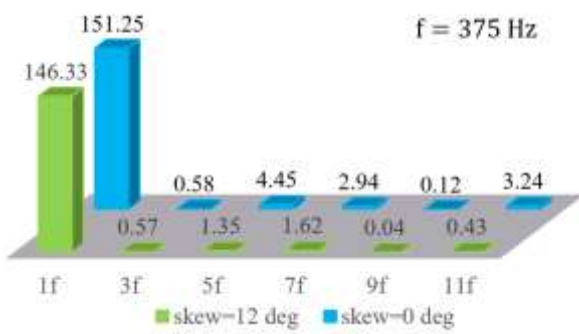
جدول (۴). مشخصات و ابعاد اصلی راه‌انداز-ژنراتور نمونه

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱۴۴	قطر خارجی استاتور (mm)	۱۰	تعداد قطب
۹۶	قطر داخلی استاتور (mm)	۱۵	تعداد شیار استاتور
۱۲۰	طول استاتور (mm)	۱۲	زاویه شیار مورب (درجه)
۲/۹	ضخامت آهن‌ربا (mm)	۱/۵	فاصله هوایی (mm)
۲۰	قطر شفت (mm)	۹۳	قطر خارجی روتور (mm)

در موتورهای آهن‌ربای دائم سطحی، پارامتری به نام پهنای زاویه‌ای (برابر با نسبت قوس قطب آهن‌ربا به گام قطبی موتور) تعریف می‌شود. این پارامتر تأثیر زیادی بر گشتاور دندانه و همچنین هارمونیک‌های ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های استاتور دارد. با لحاظ نمودن این پارامتر می‌توان یکی از هارمونیک‌های ولتاژ القایی را حذف کرد. برای این منظور کافی است رابطه (۱۰) را به ازای هارمونیک دلخواه، برابر با صفر قرارداد تا پهنای زاویه‌ای مرتبط به دست آید [۲۱].

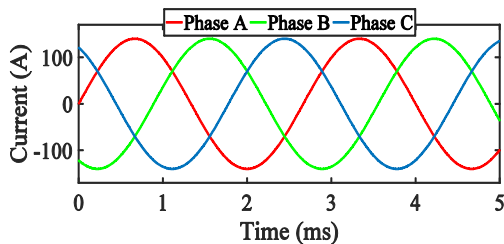
$$\sin\left(\frac{hx}{2}\right) = 0 \quad (10)$$

که h هارمونیک انتخابی و x زاویه آهن‌ربا است. یکی دیگر از مؤلفه‌های مهم در طراحی آهن‌ربا، آفست

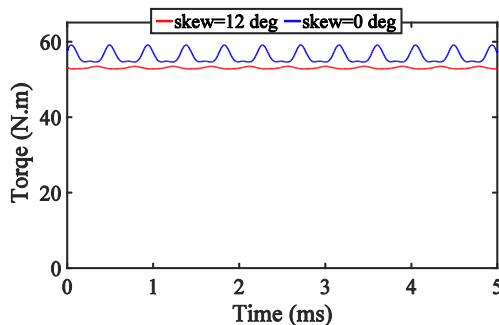


شکل (۶). تحلیل هارمونیک نیروی ضد محرکه الکتریکی فاز a در حالت راهاندازی با و بدون مورب نمودن شیار

شکل (۷) جریان‌های سه فاز عبوری از راهاندازی-ژنراتور را در حالت راهاندازی و تحت سرعت ۴۵۰۰ rpm نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این جریان‌ها با اعمال شیار مورب محاسبه شده‌اند و ملاحظه می‌شود که کاملاً متقارن و سینوسی بوده و بدین ترتیب انتظار می‌رود که ریپل گشتاور نیز در این حالت ناچیز و عملکرد موتور نرم باشد. به همین منظور گشتاور در حالت موتوری با و بدون مورب نمودن شیار محاسبه و در شکل (۸) رسم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود متوسط گشتاور بدون شیار اریب (۵۶/۰۸) از حالت با شیار اریب (۵۳/۰۳) بیشتر بوده اما ریپل گشتاور نیز بدون مورب کردن شیار (۸/۰۶ درصد) از حالت شیار مورب (۱/۲۶ درصد) بیشتر است. بنابراین با مورب کردن شیار، ریپل گشتاور کاهش می‌یابد که منجر به راهاندازی نرم برای راهاندازی-ژنراتور خواهد شد. شایان ذکر است به‌منظور مشاهده اثر مورب نمودن شیار، تغذیه ماشین به‌صورت سینوسی در نظر گرفته شده و از عملکرد درایو و تأثیر آن بر ریپل گشتاور صرف‌نظر شده است.



شکل (۷). جریان‌های سه فاز در شرایط راهاندازی



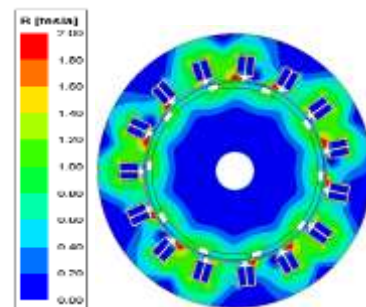
شکل (۸). گشتاور راهاندازی با و بدون مورب نمودن شیار

الکترومغناطیسی همچون نیروی محرکه الکتریکی همراه با تحلیل هارمونیک آن، جریان، گشتاور راهاندازی و گشتاور دندانه‌ای در دو حالت با و بدون مورب نمودن شیار تحلیل شده‌اند.

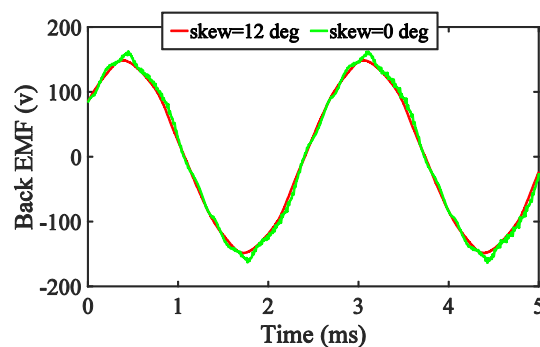
۳-۱. حالت موتوری (راهانداز)

شکل (۴) توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین را در حالت موتوری، تحت سرعت ۴۵۰۰ rpm و با در نظر گرفتن شیار مورب نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پدیده اشباع مغناطیسی تنها در گوشه‌ی دندانه‌ها رخ داده و سایر بخش‌های هسته از نظر مغناطیسی در ناحیه خطی است.

همچنین نیروی ضد محرکه الکتریکی فاز a به همراه محتوای هارمونیک آن در دو حالت با و بدون مورب نمودن شیار و تحت سرعت ۴۵۰۰ rpm به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با اعمال نمودن شیار مورب، مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ القایی کاهش یافته و این ولتاژ به حالت سینوسی نزدیک‌تر می‌شود.

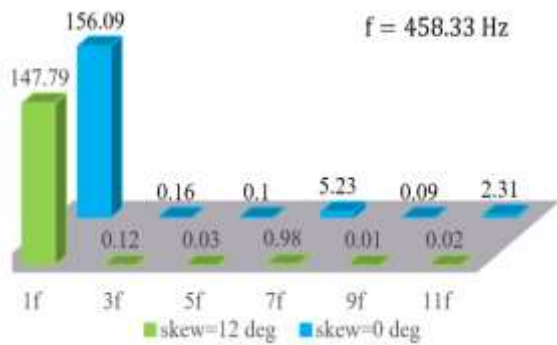


شکل (۴). توزیع چگالی شار مغناطیسی در حالت موتوری و تحت سرعت ۴۵۰۰ rpm



شکل (۵). ولتاژ ضد محرکه الکتریکی در حالت راهاندازی با و بدون مورب نمودن شیار

۳-۲. حالت بی‌باری

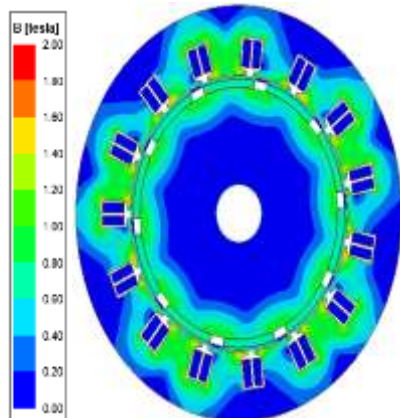


شکل (۱۲). تحلیل هارمونیک نیروی ضد محرکه الکتریکی فاز a در حالت بی‌باری با و بدون مورب نمودن شیار

همچنین نیروی ضد محرکه الکتریکی فاز a به همراه محتوای هارمونیک آن در دو حالت با و بدون مورب نمودن شیار و تحت سرعت ۵۵۰۰ rpm به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

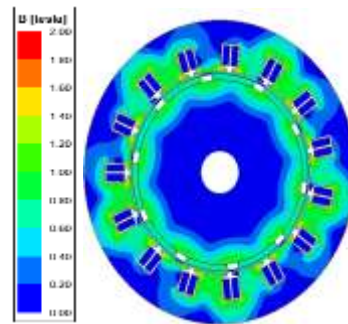
۳-۳. حالت ژنراتوری

پس از راه‌اندازی موتور اصلی هواپیما، این موتور به عنوان محرک عمل کرده و بنابراین راه‌انداز-ژنراتور در حالت مولدی قرار می‌گیرد. با توجه به بازه تغییرات سرعت موتور اصلی، سرعت راه‌انداز-ژنراتور نیز در بازه ۶۰۰۰-۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه تغییر می‌کند که منجر به تغییر دامنه ولتاژ خروجی شده و لازم است توسط یک مبدل الکترونیک قدرت ولتاژ خروجی مستقل از سرعت در مقدار نامی تثبیت گردد. شکل (۱۳) توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین را در حالت ژنراتوری، تحت سرعت ۱۲۰۰۰ rpm و با در نظر گرفتن شیار مورب نشان می‌دهد. این سرعت حداکثر سرعت گردش ژنراتور است که فرکانس یک کیلوهرتز را نتیجه می‌دهد.

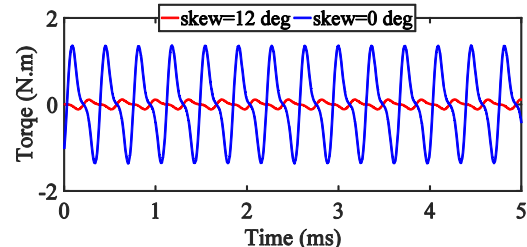


شکل (۱۳). توزیع چگالی شار مغناطیسی در حالت ژنراتوری و تحت سرعت ۱۲۰۰۰ rpm

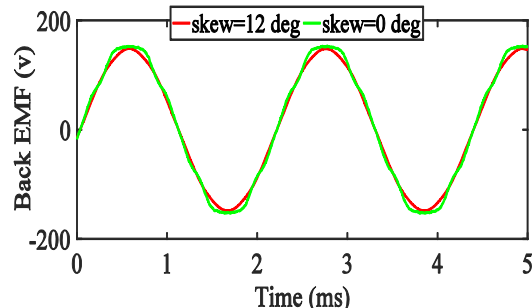
همان‌گونه که در تشریح عملکرد راه‌انداز-ژنراتور ذکر شد در بازه-ی سرعت راه‌اندازی (ω_{start}) تا حداقل سرعت حالت مولدی (ω_{min})، ماشین به صورت بی‌بار کار می‌کند. توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین در حالت بی‌باری، تحت سرعت ۵۵۰۰ rpm و با در نظر گرفتن شیار مورب در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با توجه به بی‌بار بودن ماشین مدار مغناطیسی کاملاً در ناحیه خطی بوده و در هیچ بخشی اشباع مغناطیسی رخ نداده است. در ادامه تغییرات گشتاور دندانه‌ای (ناشی از تعامل میدان آهن‌ربا و دندانه‌های استاتور) در دو حالت با و بدون مورب نمودن شیار در شکل (۱۰) آمده است. آن‌طور که مشاهده می‌شود گشتاور دندانه با مورب کردن شیار، به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد.



شکل (۹). توزیع چگالی شار مغناطیسی در حالت بی‌باری و تحت سرعت ۵۵۰۰ rpm



شکل (۱۰). گشتاور دندانه در دو حالت با و بدون مورب نمودن شیار در حالت بی‌باری و تحت سرعت ۵۵۰۰ rpm



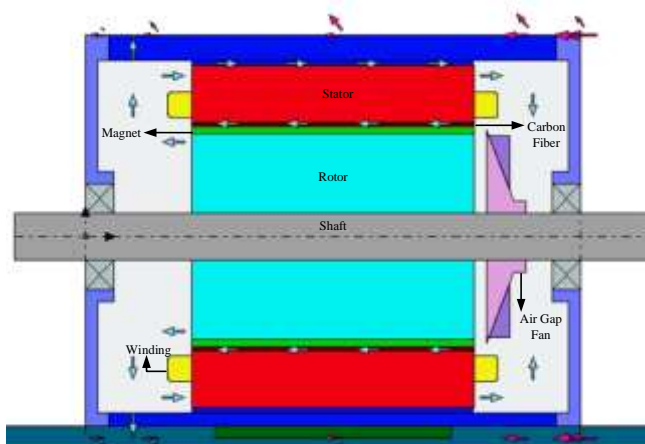
شکل (۱۱). ولتاژ ضد محرکه الکتریکی فاز a در حالت بی‌باری با و بدون مورب نمودن شیار

می‌گیرد، محاسبات انتقال گرمایی را نیز ساده می‌کند [۲۵].

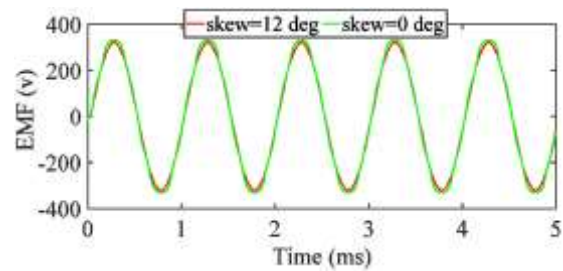
خنک کاری ماشین نمونه از نوع اجباری و عمده گردش جریان هوا توسط فن فاصله هوایی در استاتور و فاصله هوایی صورت می‌گیرد تا منجر به کاهش دمای اجزای مختلف راه‌انداز-ژنراتور گردد. همچنین دمای محیط ۵۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. شکل (۱۶) بخش‌های مختلف ماشین و فرآیند خنک کاری آن را در حالت محوری نشان می‌دهد. نتایج تحلیل حرارتی برای حالت موتوری و ژنراتوری با در نظر گرفتن تلفات مسی سیم‌پیچ استاتور، تلفات آهنی و تلفات آهن‌ریا به شرح زیر است:

در حالت موتوری، راه‌انداز-ژنراتور تحت ولتاژ نامی تغذیه می‌گردد تا موتور اصلی هواپیما را راه‌اندازی کند. بر اساس مستندات فنی زمان راه‌اندازی موتور ۵ ثانیه در نظر گرفته شده است.

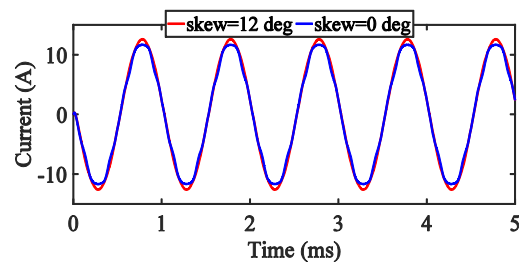
نمودار تغییرات حرارتی بخش‌های مختلف راه‌انداز-ژنراتور در طول ۵ ثانیه در شکل (۱۷) رسم شده است. آن گونه که مشاهده می‌شود طی دوره راه‌اندازی دمای بخش‌های گردان ماشین (هسته روتور، آهن‌ریا) با شیب بیشتری افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در پایان این دوره دمای یوغ روتور به $64/3$ درجه و دمای آهن‌ریا به $67/9$ درجه می‌رسد. بدین ترتیب تغییرات حرارتی در محدوده مجاز بوده و عملکرد ماشین نمونه در شرایط راه‌اندازی قابل قبول است. شایان ذکر است که با توجه به نوع خنک کاری ماشین، چگالی جریان در هادی‌ها برابر $6/5 \text{ [} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}\text{]}$ در نظر گرفته شده و سطح مقطع سیم‌پیچ معادل جریان ۲۳ آمپر انتخاب شده است. در شرایط راه‌اندازی برای مدت ۵ ثانیه جریانی حدود سه برابر این مقدار از ماشین عبور می‌کند که با توجه به کوتاه بودن بازه زمانی و تبادل حرارتی استاتور با خارج، افزایش دمای سیم‌بندی و یوغ استاتور ناچیز است. در حالت ژنراتوری ماشین توسط موتور هواپیما به حرکت درمی‌آید و جریان عبوری از آن به بار خروجی بستگی دارد. زمان کارکرد ماشین نیز بسیار بیشتر است. به همین دلیل عملکرد حرارتی راه‌انداز-ژنراتور طی زمان یک ساعت و تحت بار نامی بررسی شده است.



شکل (۱۶). خنک کاری راه‌انداز-ژنراتور در حالت محوری



شکل (۱۴). ولتاژ القایی فاز a در حالت ژنراتوری در سرعت ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه با و بدون مورب نمودن شیار



شکل (۱۵). جریان عبوری از فاز a در حالت ژنراتوری تحت سرعت ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه با و بدون مورب نمودن شیار

تغییرات چگالی شار در بخش‌های مختلف ماشین مبین عدم اشباع مدار مغناطیسی تحت حداکثر فرکانس کاری است.

همچنین ولتاژ القایی فاز a به همراه جریان عبوری از آن در حالت با و بدون مورب نمودن شیار، تحت سرعت 12000 rpm و بار مقاومتی (ضریب توان واحد) به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به اینکه سرعت متوسط ماشین 6000 rpm است، در سرعت 12000 rpm ، ولتاژ خروجی تا دو برابر مقدار نامی افزایش می‌یابد. همچنین مطابق با شکل (۱۵) در حالت شیار مورب دامنه جریان تا $12/7 \text{ A}$ (مقدار مؤثر 9 A) افزایش می‌یابد که معادل جریان بار کامل در حالت ژنراتوری است.

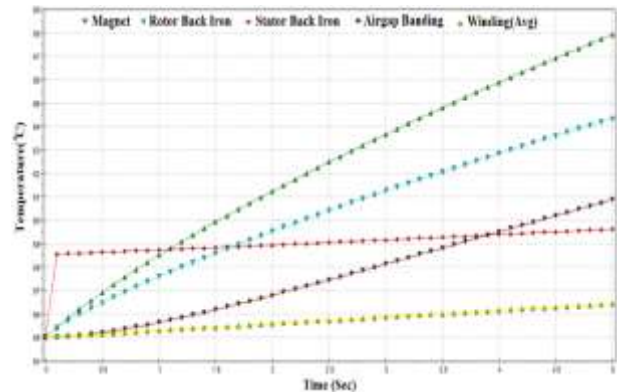
۴- تحلیل حرارتی

ساختار پیچیده ماشین‌های الکتریکی برای محاسبات گرمایی از یک طرف و آگاهی از منابع تولید گرما در آن‌ها به منظور عایق بندی مناسب، اهمیت تحلیل حرارتی را دوچندان می‌کند. در ساختار موردنظر، چون راه‌انداز-ژنراتور در حالت راه‌اندازی توان ۲۵ کیلووات را باید تأمین کند، جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها باعث افزایش دمای سیم‌پیچ شده و ممکن است به عایق سیم‌بندی آسیب برساند، همچنین در حالت ژنراتوری چون فرکانس کاری ماشین تا ۱ کیلوهرتز افزایش می‌یابد، بررسی تأثیر تلفات آهنی بر قسمت‌های مختلف ماشین و طراحی خنک کاری مناسب برای آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور برای تحلیل حرارتی راه‌انداز-ژنراتور از نرم‌افزار موتور-کد استفاده شده است. محاسبات گرمایی در این نرم‌افزار، بر پایه مدارات فشرده صورت گرفته که منجر به افزایش سرعت محاسبات می‌شود. از سوی دیگر چون طراحی خنک کاری بر اساس ابعاد واقعی ماشین صورت

عملکرد حرارتی ماشین مشاهده شد که علی‌رغم عبور جریان راه‌اندازی در حالت موتوری، به دلیل کوتاه بودن زمان راه‌اندازی افزایش دمای بخش‌های مختلف از بازه‌ی مجاز تجاوز نمی‌کند. همچنین برخلاف حالت موتوری که بیشترین افزایش دما مربوط به روتور بود، در حالت ژنراتوری با توجه به افزایش زمان کارکرد، یوغ استاتور و سیم‌پیچ بیشترین افزایش دما را تجربه کرده و به ترتیب به ۹۳/۲ و ۹۵/۳ درجه خواهند رسید. در مجموع، ارزیابی کمیت‌های الکترومغناطیسی همچون توزیع چگالی شار، نیروی ضد محرکه الکتریکی و گشتاور به همراه تحلیل حرارتی عملکرد ماشین، صحت طراحی انجام‌گرفته را نشان می‌دهد.

۵- مراجع

- [1] B. L. G. Jonsson and F. Ferrero, "On small antennas with circular polarization, bandwidth estimates and design considerations," 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE, 2023.
- [2] [S. Moeini, A. Omidvar and S. H. Mohseni Ermaki, "Design and construction of broadband antenna with circular polarization," Applied Electromagnetism biannual scientific journal, vol. 7\(1\), pp.83-88, 2019. \(In Persian\) https://doi.org/10.1001/1.26455153.1398.7.1.9.2](https://doi.org/10.1001/1.26455153.1398.7.1.9.2)
- [3] [Y. Haghian, S. M. Mohseni Aramaki and M. Kazroni, "Design, simulation and fabrication of microstrip antenna arrays with circular polarization in S band," Applied Electromagnetism, vol. 2, 2014. \(In Persian\) https://doi.org/10.1001/1.26455153.1393.2.1.6.4](https://doi.org/10.1001/1.26455153.1393.2.1.6.4)
- [4] [M. Khalaj-Amirhosseini, M. Nadi-Abiz, "Multi-petal wire antenna with omnidirectional radiation with circular polarization in bands," Applied Electromagnetism, vol. 4, pp.13-20, 2016 \(In Persian\) https://doi.org/10.1001/1.26455153.1395.4.2.2.6](https://doi.org/10.1001/1.26455153.1395.4.2.2.6)
- [5] W. S. Chen, C. K. Wu, and K. L. Wong, "Square-ring microstrip antenna with a cross strip for compact circular polarization operation," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 47, pp. 1566–1568, Oct. 1999.
- [6] X. M. Qing and M. Y. W. Chia, "Broadband circularly polarized slot loop antenna fed by three-step hybrid coupler," Electron. Lett., vol. 35, pp. 1210–1211, July 1999.
- [7] H. Morishita, K. Hirasawa, and T. Nagao, "Circularly polarized wire antenna with a dual rhombic loop," Proc. Inst. Elect. Eng.-Microw. Antennas Propag., vol. 145, pp. 219–224, June 1998.
- [8] M. Sumi, K. Hirasawa, and S. Shi, "Two rectangular loops fed in series for broadband circular polarization and impedance matching," IEEE Transactions on Antennas and Propagation 52.2 (2004): 551-554.



شکل (۱۷). تغییرات حرارتی بخش‌های مختلف راه‌انداز-ژنراتور در طول ۵ ثانیه

جدول (۵). دمای نهایی قسمت‌های مختلف راه‌انداز- ژنراتور

دمای نهایی (سانتی‌گراد)		بخش ماشین
ژنراتور	موتور	
۸۲/۹	۶۰/۹	فیبر کربن
۹۵/۳	۵۶/۷	سیم‌پیچ
۸۵/۷	۶۷/۹	آهن‌ربا
۹۳/۲	۵۹/۶	یوغ استاتور
۸۳/۹	۶۴/۳	یوغ روتور

دمای بخش‌های مختلف ماشین در پایان این دوره در جدول (۵) ذکر شده است. مشاهده می‌شود که برخلاف حالت موتوری که بیشترین افزایش دما مربوط به روتور بود، در حالت ژنراتوری با توجه به افزایش زمان کارکرد، یوغ استاتور و سیم‌پیچ بیشترین افزایش دما را تجربه کرده و به ترتیب به ۹۳/۲ و ۹۵/۳ درجه خواهند رسید.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ضمن بیان ملزومات طراحی راه‌انداز-ژنراتور و بررسی شرایط کاری آن در هوافضا، فرآیند طراحی یک راه‌انداز- ژنراتور سنکرون آهن‌ربای دائم با توان نامی ۶ کیلووات و گشتاور راه‌اندازی ۵۳ نیوتن‌متر تشریح شد. تحلیل عملکرد الکترومغناطیسی ماشین نشان داد که ساختار ۱۵ شیار و ۱۰ قطب، با سیم‌بندی دولایه از نوع متمرکز و انتخاب سرعت مینا برابر با حد پایین بازه تغییرات سرعت در حالت ژنراتوری، می‌تواند ملزومات مشخصه گشتاور سرعت را برآورده نماید. همچنین مورب نمودن شیارهای استاتور ضمن کاهش مؤلفه‌های هارمونیک موجود در ولتاژ القایی هر فاز، موجب کاهش قابل‌توجه گشتاور دندانه‌ای خواهد شد. اگرچه در حالت شیار مورب متوسط گشتاور حدود ۵ درصد کاهش می‌یابد اما ریپل گشتاور نیز از ۸/۰۶ درصد به ۱/۲۶ درصد کاهش می‌یابد که منجر به راه‌اندازی نرم ماشین می‌گردد. در ادامه با بررسی

- [17] H. Xu, G. Wang, J. Liang, M. Qi and Z. Gao, "Compact circularly polarized combining meta-surfaces and strong space-filling metaresonators," *IEEE Trans, Antennas Propag.*, vol. 61, no. 7, pp. 3442–3450, Jul. 2013
- [18] T. Tsukiji and S. Tou, "On polygonal loop antennas." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 28, pp. 571-575, 1980.
- [19] [F. Mohammadzadeh, et al. "Design, simulation and fabrication of high power radial linear slotted array antenna." *Bi-Quarterly Journal of Applied Electromagnetism* vol. 11, pp. 75-85, 2023. \(In Persian\)<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1402.11.1.8.9>](https://doi.org/10.1001/1.26455153.1402.11.1.8.9)
- [20] K. Nadali, P. McEvoy and M. Ammann, "A broadband CP elliptical-slot antenna for ambient RF energy harvesting," *16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5, IEEE, 2022.
- [21] S. X. Ta, et al, "Single-feed, compact, GPS patch antenna using metasurface," *International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. IEEE, 2017.
- [22] H. Oraizi, "Impedance matching and BALUNs," *Handbook of antenna technologies*, pp. 3349-3428, 2015.
- [9] G. Yang, M. Ali and R. Dougal. "A wideband circularly polarized microstrip patch antenna for 5–6-GHz wireless LAN applications," *Microwave and optical technology letters* 45.4 (2005): 279-285.
- [10] S. I. Latif and L. Shafai, "Circular polarisation from dual-layer square-ring microstrip antenna," *IET microwaves, antennas & propagation*, vol. 6, pp. 1-9, 2012.
- [11] Y. Dong and T. Itoh, "Metamaterial-based antennas," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2271–2285, Jul. 2012.
- [12] S. X. Ta, et al, "Single-feed, compact, GPS patch antenna using metasurface." *International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, IEEE, 2017.
- [13] H. Mosallaei and K. Sarabandi, "Antenna miniaturization and bandwidth enhancement using a reactive impedance substrate," *IEEE Trans, Antennas Propag*, vol. 52, no. 9, pp. 2403–2414, Sep. 2004.
- [14] Y. Dong, H. Toyao and T. Itoh, "Compact circularly-polarized patch antenna loaded with metamaterial structures," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 11, pp. 4329–4333, Nov. 2011.
- [15] Y. Dong, H. Toyao and T. Itoh, "Design and characterization of miniaturized patch antennas loaded with complementary split-ring resonators," *IEEE Trans, Antennas Propagat*, vol. 60, no. 2, pp. 772–785, Feb. 2012.
- [16] K. Agarwal, Nasimuddin and A. Alphones, "RIS based compact circularly polarized microstrip antennas," *IEEE Trans, Antennas Propag.*, vol. 61, no. 2, pp. 547–554, Feb. 2013.