



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 4, 2021
Research Paper

Optimal Design of a Radial-Flux Permanent Magnet Generator with Outer-Rotor for Direct-Drive Wind Turbines

Aliakbar Abdoos¹, Mohammad Ebrahim Moazzen², Ali Ebadi³

¹ Dept. of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshiravani University of Technology, Babol, Iran

² Dept. of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshiravani University of Technology, Babol, Iran

³ Dept. of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshiravani University of Technology, Babol, Iran

Abstract:

Permanent magnet machines are widely used in wind turbines due to their prominent characteristics. The direct-drive wind generators have large size and high manufacturing cost because of low operational speed so that these disadvantages deteriorate when the rated output power increases. Therefore, the main objective of the optimal design proposed in this paper is to minimize the wind turbine system cost maintaining the high efficiency characteristic. Thus, a multiphysics model of the wind generation system is firstly presented to be the basis of the optimal design. One of the paramount feature of the current study is to precisely calculate all of the energy production costs, including the manufacturing cost of generator, power converter, electrical subsystem, and also wind turbine tower cost. In order to obtain the optimum solution, the Genetic Algorithm (GA) optimization method is implemented with consideration of a predetermined proper range for optimal variables. By comparing the optimal design results with those attained by the inner-rotor permanent magnet generator, the superiority of the proposed method is justified in terms of the total volume, weight, and annual output energy. Eventually, the finite element analysis has also been carried out to validate the outcomes obtained from the proposed optimal design.

Keywords: Permanent Magnet Generator, Optimal Design, Manufacturing Cost, Wind Turbine.



2252-083X/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.117057.1227>

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در

توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده

علی اکبر عبدوس^۱، محمدابراهیم موذن^۲، علی عبادی^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران

a.abdoos@nit.ac.ir

۲- دانشجو دکترا، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران

m.moazzen@stu.nit.ac.ir

۳- دانشجو دکترا، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران

a.ebadi@stu.nit.ac.ir

چکیده: ماشین‌های آهنربای دائم به دلیل ویژگی‌های برجسته خود به‌طور گسترده در حال استفاده در توربین‌های بادی‌اند. ژنراتورهای متصل به توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده به علت سرعت نامی پایین دارای حجم بالا و هزینه ساخت زیادند که با افزایش توان خروجی بر این معایب افزوده خواهد شد؛ در نتیجه، هدف از طراحی بهینه در این مقاله، کاهش هزینه ساخت سیستم توربین بادی با حفظ مشخصه راندمان بالا است؛ بنابراین، یک مدل مولتی‌فیزیک از مجموعه تولید انرژی در توربین بادی ارائه شده است که طراحی بهینه بر پایه آن استوار خواهد بود. از ویژگی‌های بارز این مطالعه، محاسبه دقیق تمامی هزینه‌های مربوط به تولید انرژی اعم از هزینه ساخت ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، تجهیزات جانبی الکتریکی و برج توربین بادی است. به‌منظور یافتن جواب بهینه، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با در نظر گرفتن یک محدوده مناسب از پیش تعیین شده برای متغیرهای طراحی استفاده می‌شود. مقایسه ژنراتور بهینه‌شده در این مطالعه با یک نمونه ژنراتور آهنربای دائم رتور داخلی، کارایی روش پیشنهادی و برتری آن را از نظر حجم کلی، وزن و انرژی تحویلی سالیانه نشان می‌دهد. در انتها نیز صحت طراحی بهینه با تحلیل اجزای محدود تأیید شده است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، ژنراتور آهنربای دائم، طراحی بهینه، هزینه ساخت

۱- مقدمه

ظرفیت توربین‌های بادی نصب‌شده در جهان تا سال ۲۰۰۰ میلادی ۱۸ گیگاوات بوده و با پیشرفتی چشمگیر در سال ۲۰۱۸ به ۵۹۱ گیگاوات افزایش یافته است [۱]. از میان ژنراتورهای مرسوم به‌کاررفته در توربین‌های بادی، ژنراتورهای آهنربای دائم به دلیل ساختمان ساده، راندمان، قابلیت اطمینان و چگالی توان بالا گزینه مناسبی برای این نوع کاربردها هستند [۲]. ساختارهای متفاوتی از ماشین‌های آهنربای دائم برای این نوع کاربرد معرفی شده‌اند؛ اما ژنراتور شارشعاعی به علت طراحی و ساختمان ساده، قابلیت اطمینان بالا و سهولت بهره‌برداری یک انتخاب مناسب برای توربین‌های بادی است [۳، ۴].

استفاده از توربین‌های بادی به‌عنوان ساده‌ترین روش در بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌منظور تولید الکتریسیته، رشد فزاینده‌ای را طی دو دهه گذشته تجربه کرده است. اهمیت موضوع زمانی آشکار می‌شود که کل

^۱ تاریخ ارسال مقاله: -/۱۳۹۸

تاریخ پذیرش مقاله: -/۱۳۹۸

نام نویسنده مسئول: علی اکبر عبدوس

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - دانشگاه صنعتی نوشیروانی

بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

هزینه طول عمر در بهینه‌سازی طراحی ژنراتور لحاظ می‌شود، هزینه‌ها فراتر از هزینه سرمایه‌گذاری اولیه خواهد بود. در [۱۱]، طراحی بهینه یک ژنراتور سنکرون آهنربای دائم برای استفاده در توربین بادی بدون جعبه‌دنده برای کاهش هزینه تولید انرژی ارائه شده است. طراحی بهینه با در نظر گرفتن چندین تابع هدف برای دو رتور با ساختار متفاوت و دو ماده آهنربای خاک کمیاب و آهنربای فریت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند هزینه تولید انرژی و مواد مصرفی ژنراتور طراحی شده با آهنربای خاک کمیاب به مراتب کمتر از آهنربای فریت است. در [۱۲]، طراحی بهینه دو نوع ژنراتور آهنربای دائم، رتور داخلی و رتور خارجی برای مقایسه عملکرد در کاربرد توربین بادی انجام شده است. هدف از طراحی بهینه، کاهش وزن ژنراتور بوده است. نتایج طراحی نشان می‌دهند ژنراتور آهنربای دائم نوع رتور خارجی در مقایسه با نوع رتور داخلی داری وزن کمتر و راندمان بیشتری است. در [۱۳]، طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم برای استفاده در توربین‌های بادی با هدف کاهش هزینه کلی سیستم انجام شده است. علاوه بر هزینه ساخت ژنراتور، هزینه تلفات و مبدل الکترونیک قدرت نیز در طراحی بهینه لحاظ شده است. همچنین نشان داده شده است کاهش زاویه فاز جریان ژنراتور به کاهش هزینه ساخت کلی سیستم منجر می‌شود. بهینه‌سازی طراحی یک ژنراتور آهنربای دائم رتور خارجی به منظور کاهش هزینه ساخت و افزایش توان خروجی در [۱۴] ارائه شده است. روش بهینه‌سازی در این مطالعه، ترکیب روش شناسایی سطح پاسخ، الگوریتم بوت و الگوریتم شبیه‌سازی آنتیلینگ است.

براساس روابط طراحی ماشین‌های الکتریکی، ابعاد آن به‌طور عمده متأثر از سرعت نامی بوده است؛ به‌طوری‌که با کاهش سرعت نامی ابعاد ماشین افزایش خواهد یافت [۵،۹]؛ بنابراین، یکی از مشخصه‌های نامطلوب ژنراتورهای متصل به توربین بادی بدون جعبه‌دنده هزینه ساخت زیاد آنها است؛ بنابراین، هدف از طراحی بهینه در این مطالعه، کاهش هزینه ساخت سیستم توربین بادی با حفظ مشخصه راندمان بالا است. به همین منظور یک مدل دقیق مولتی‌فیزیک از ژنراتور و توربین بادی استخراج می‌شود و سپس با استفاده

مطالعات فراوانی به منظور بهبود عملکرد ژنراتورهای آهنربای دائم متصل به توربین بادی انجام شده است؛ برای نمونه، طراحی بهینه، تحلیل اجزای محدود و تست عملی یک ژنراتور آهنربای دائم با رتور خارجی برای کاربرد در توربین بادی بدون جعبه‌دنده در [۵] ارائه شده است. در این تحقیق طراحی بهینه به منظور کاهش هزینه ساخت ژنراتور انجام شده است. تحلیل صورت‌گرفته نشان می‌دهد ژنراتور در یک محدوده وسیع از تغییرات سرعت باد دارای عملکرد بسیار خوب و مطمئن است. در [۶]، مقایسه سه نوع ژنراتور متصل به توربین بادی شامل ژنراتور القایی دوسو تغذیه، ژنراتور سنکرون با تحریک خارجی و ژنراتور سنکرون آهنربای دائم براساس انرژی تحویلی سالیانه به شبکه انجام شده است. مطالعه انجام‌شده نشان می‌دهد ژنراتور آهنربای دائم در مقایسه با دو ژنراتور دیگر، انرژی تحویلی سالیانه به شبکه بیشتری خواهد داشت. طراحی بهینه چندین ژنراتور آهنربای دائم با توان و سرعت نامی متفاوت برای کاهش هزینه سیستم توربین بادی در [۷] انجام شده است. مقایسه صورت‌گرفته بین نتایج نشان می‌دهد ژنراتورهایی با توان بیشتر و سرعت نامی کمتر دارای ابعاد و هزینه بالاتری بوده است؛ ولی چگالی گشتاور و نسبت گشتاور به هزینه آنها بهتر شده است. در [۸]، طراحی بهینه یک ژنراتور سنکرون آهنربای دائم رتور خارجی برای کاربرد در توربین بادی بدون جعبه‌دنده به منظور کاهش گشتاور دندانه‌ای انجام شده است. با مطالعه عوامل مؤثر بر گشتاور دندانه‌ای و اعوجاج هارمونیک ولتاژ مانند قوس قطب، گام شیار و ارتفاع یوغ استاتور و رتور و اعمال محدودیت‌هایی از قبیل ساخت، وزن، ریپل گشتاور بار و کیفیت ولتاژ در روند طراحی، نتایج مطلوب حاصل شده است. در [۹]، یک روش بهینه‌سازی ساده ریاضی به نام ضرائب لاگرانژ برای افزایش توان عبوری از فاصله هوایی یک ژنراتور سنکرون آهنربای دائم توان بالا تحت محدودیت تنش مماسی ارائه شده است. نویسندگان در [۱۰]، روشی دقیق و جدید به منظور محاسبه هزینه در طول عمر یک ژنراتور سنکرون آهنربای دائم متصل به توربین بادی بدون جعبه‌دنده ارائه داده‌اند. این روش براساس ارزیابی طول عمر و همچنین محاسبه انرژی تحویلی سالیانه بوده و نشان داده شده است در زمانی که

۲-۲- ژنراتور آهنربای دائم

به طور معمول ژنراتورهای آهنربای دائم به کاررفته در توربین های بادی از نوع شار شعاعی با رتور داخلی اند. از آنجایی که در کاربردهای سرعت پایین برای ایجاد یک فرکانس مناسب به تعداد قطب زیاد نیاز است، در این نوع ژنراتورها به دلیل قطر رتور کوچک تعبیه قطب زیاد امکان پذیر نیست. برای حل این مشکل از ژنراتور آهنربای دائم رتور خارجی در این مطالعه استفاده شده است. این نوع ساختار علاوه بر راندمان و چگالی توان بالا دارای مزایایی به شرح زیر است [۲,۵,۱۲]:

۱- قطر رتور آن در مقایسه با نوع رتور داخلی بزرگ تر بوده که امکان تعبیه تعداد قطب زیاد و کوتاه تر شدن گام قطب نیز فراهم است.

۲- به دلیل کوتاه تر بودن گام قطب، طول مسیر مغناطیسی کمتر بوده است که به کاهش ضخامت یوغ رتور، حجم و وزن کلی ماشین منجر خواهد شد. همچنین طول انتهای کلاف نیز کمتر است و کاهش تلفات مسی را نیز در پی دارد.

۳- این نوع ساختار، بسیار مناسب برای توربین بادی بدون جعبه دنده است؛ زیرا توپی (هاب) پره های توربین بادی بدون واسطه مکانیکی به رتور خارجی متصل می شود. ساختمان ژنراتور آهنربای دائم با رتور خارجی در شکل (۱) مشاهده می شود. پارامترهای مهم ژنراتور در جدول (۲) نمایش داده شده اند. فرضیه های زیر در روند طراحی بهینه به منظور بهبود عملکرد ژنراتور اعمال شده اند:

۱- به منظور بهبود عملکرد مکانیکی ژنراتور، طول فاصله هوایی $0/1$ درصد قطر بیرونی استاتور و حداقل عرض دندانه استاتور 10 میلی متر در نظر گرفته شده است [۴,۱۵]. برای داشتن شیارهایی با ابعاد مناسب، نسبت ارتفاع شیار (h_f) به عرض شیار (W_s) استاتور بین $10-4$ محدود شده است [۳]. همچنین ضریب اشغال شیار استاتور $0/6$ فرض شده است.

۲- به منظور حفظ استحکام مکانیکی دندانه های استاتور و همچنین اهمیت کم کیفیت ولتاژ در ژنراتورهای متصل به توربین های بادی سرعت متغیر، نسبت شیار بر قطب بر فاز

از الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه متغیرهای طراحی به منظور کاهش هزینه ساخت سیستم توربین بادی در یک محدوده مناسب به دست می آیند. به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی نتایج به دست آمده از لحاظ حجم، وزن، راندمان و انرژی تحویلی سالیانه به شبکه با نمونه ژنراتور رتور داخلی بهینه شده در [۳] مقایسه می شود. در این مقاله، مشخصات توربین بادی و ژنراتور آهنربای دائم در بخش ۲ معرفی شده اند. در بخش ۳، مدل طراحی مولتی فزیک سیستم توربین بادی به تفصیل تشریح شده و معرفی الگوریتم بهینه سازی ژنتیک نیز در بخش ۴ به طور اجمال صورت گرفته است. در بخش ۵ با انجام بهینه سازی طراحی، نتایج به دست آمده ارائه شده اند. در پایان نیز اعتبار نتایج حاصل از طراحی بهینه به واسطه تحلیل اجزای محدود تأیید شده است.

۲- مشخصه های طراحی

در این بخش ساختار توربین بادی و ژنراتور آهنربای دائم به تفصیل شرح داده شده است. همچنین فرضیه ها و پارامترهای مهم طراحی نیز ارائه شده اند.

۲-۱- توربین بادی

در این مقاله، توربین بادی بدون جعبه دنده به دلیل مزیت های مناسب مطالعه شده است. از ویژگی های سیستم بدون جعبه دنده، افزایش بازدهی و کاهش حجم کلی سیستم، کاهش هزینه تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان بالا به دلیل حذف جعبه دنده هستند [۳,۴]. مشخصه های توربین بادی و مزرعه بادی مطالعه شده در جدول (۱) ارائه شده اند.

جدول (۱): مشخصات توربین و مزرعه بادی

پارامترها	واحد	مقدار
شعاع رتور	m	۴۵
سرعت نامی باد	m/s	۱۲
متوسط سرعت باد	m/s	۷
بازده آیرودینامیکی	-	۰/۴۵
سرعت نامی محور	rpm	۲۸/۶

۳- مدل تحلیلی مولتی فیزیک

در این بخش، مدل تحلیلی مولتی فیزیک سیستم توربین بادی بررسی می‌شود. مدل تحلیلی ارائه‌شده شامل عملکرد توربین بادی، رفتار الکتریکی و مغناطیسی ژنراتور و همچنین محاسبه کل هزینه تولید انرژی به‌واسطه یک توربین بادی است. در زیربخش‌های زیر جزئیات مدل ارائه‌شده بررسی شده است: مدل‌سازی انرژی بادی، هندسی، مغناطیسی، الکتریکی و اقتصادی.

۳-۱- مدل‌سازی انرژی باد

در این قسمت، محاسبه توان قابل دریافت از توربین بادی و تخمین انرژی تحویلی سالیانه به شبکه توسط ژنراتور ارائه شده است. معمولاً توان تولیدی یک توربین بادی را با منحنی توان تشریح می‌کنند که رابطه بین سرعت باد و توان دریافتی از توربین بادی یا ژنراتور است. رابطه بین توان و سرعت باد در یک توربین بادی سرعت متغیر به‌صورت رابطه زیر است [۱۷]:

$$\begin{cases} P_T = 0 & \text{if } v_j < 3 \text{ or } v_j > 25 \\ P_T = 0.5 C_p \rho_{air} \pi R^2 v_j^3 & \text{if } 3 \leq v_j < 12 \\ P_T = 0.5 C_p \rho_{air} \pi R^2 12^3 & \text{if } 12 \leq v_j < 25 \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه P_T توان استحصال‌شده از توربین بادی برحسب وات، v_j سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، R شعاع پره توربین بر حسب متر، ρ_{air} چگالی هوا (۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و C_p بازده آیرودینامیکی توربین بادی است. در رابطه فوق حداقل سرعت باد برای تولید توان (v_i) ۳ متر بر ثانیه و حداکثر سرعت باد برای تولید توان (v_o) ۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. سرعت باد به‌عنوان یک متغیر تصادفی پیوسته با توابع چگالی احتمال مدل می‌شود. در این مطالعه، از تابع توزیع رایلی برای توصیف سرعت باد استفاده شده است [۱۸]:

$$f(v_j) = \frac{\pi}{2} \frac{v_j}{(\bar{v})^2} e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_j}{\bar{v}}\right)^2} \quad (2)$$

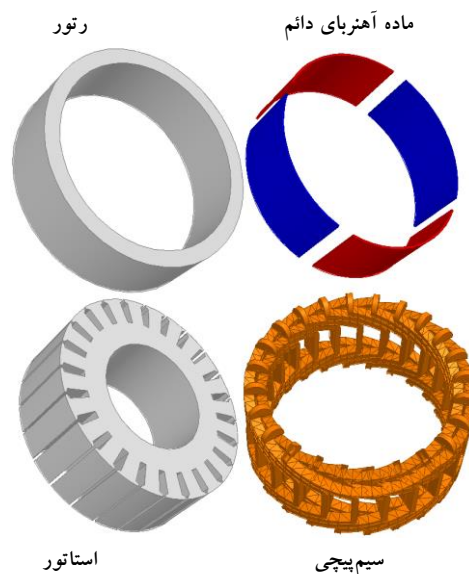
۱ لحاظ شده است. سیم پیچی ژنراتور از نوع توزیع‌شده دوطبقه است. با انجام اتصال ستاره، هارمونیک سوم و مضارب آن در ولتاژ و جریان خط حذف می‌شوند؛ بنابراین، برای کاهش هارمونیک‌های ۵ و ۷ به‌طور هم‌زمان، نسبت گام کلاف به گام قطب ۵/۶ انتخاب شده است.

۳- نوع ماده آهنربا دائم به‌کاررفته در این مقاله NdFeB50 با چگالی شار پس ماند ۱/۴۲ تسلا است.

۴- نسبت طول (L) به قطر خارجی استاتور (D) با توجه به نوع ژنراتور و کاربرد آن، به‌عنوان یکی دیگر از متغیرهای طراحی بین ۰/۱۴ تا ۰/۵ انتخاب شده است [۱۶].

۵- با توجه به محدوده فرکانس نامی برای یک ژنراتور آهنربای دائم متصل به توربین بادی بدون جعبه‌دنده که بین ۳۰-۸۰ هرتز [۵] یا ۷۰-۱۰۰ هرتز [۱۶] گزارش شده است، تعداد جفت قطب ژنراتور برای سرعت نامی ۱۶ دور بر دقیقه به‌عنوان یکی از متغیرهای طراحی بین ۳۸ تا ۲۶۰ انتخاب شده است.

۶- تلفات اصطکاک و بادخوری ۰/۵ درصد توان مکانیکی شفت و حداقل راندمان ژنراتور در روند طراحی بهینه نیز ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است [۱۳].



شکل (۱): ساختمان ماشین آهنربای دائم شارشعاعی با رتور

بار است که برای یک ژنراتور آهنربای دائم متصل به مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشت، یک انتخاب می‌شود [۲۰]. با انتخاب یک نسبت مناسب بین طول استاتور و قطر خارجی آن می‌توان ابعاد اصلی ماشین را از طریق رابطه (۴) و (۵) محاسبه کرد. همچنین B_{mg1} حداکثر مقدار مؤلفه اول چگالی شار فاصله هوایی است که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۶، ۱۹]:

$$B_{mg1} = \frac{4}{\pi} B_{mg} \sin\left(\frac{\pi}{2} \alpha_i\right) \quad (6)$$

در رابطه فوق B_{mg} حداکثر چگالی شار فاصله هوایی و α_i نسبت قوس قطب به گام قطب است. برای تعیین ابعاد یک ماشین آهنربای دائم، بهتر است B_{mg} بین ۶۰ تا ۸۰ درصد چگالی شار پس‌ماند ماده آهنربای دائم (Br) انتخاب شود [۱۹]. چگالی شار فاصله هوایی و مؤلفه اول آن در شکل (۴) نمایش داده شده است. ضخامت ماده آهنربای دائم طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴، ۹]:

$$h_{pm} = \frac{B_{mg}}{B_r} \mu_{rec} \cdot g_{eff} \quad (7)$$

که μ_{rec} ضریب نفوذپذیری ماده آهنربای دائم و g_{eff} طول مؤثر فاصله هوایی است. در یک ماشین الکتریکی مسیر برگشت شار بین قطب‌ها از طریق دندانه‌ها، یوغ استاتور و رتور است؛ بنابراین، برای جلوگیری از اشباع مغناطیسی، تعیین ابعاد این بخش از ماشین باید با دقت خاصی انجام شود. ضخامت یوغ استاتور و رتور و عرض دندانه استاتور به صورت تابعی از چگالی شار فاصله هوایی به ترتیب طبق روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند [۹، ۱۵، ۲۱]:

$$h_{bi} = \frac{B_{mg} D}{k_{st} B_{bi} P} \quad (8)$$

$$w_t = \frac{B_{mg} \pi D}{Q k_{st} B_t} \quad (9)$$

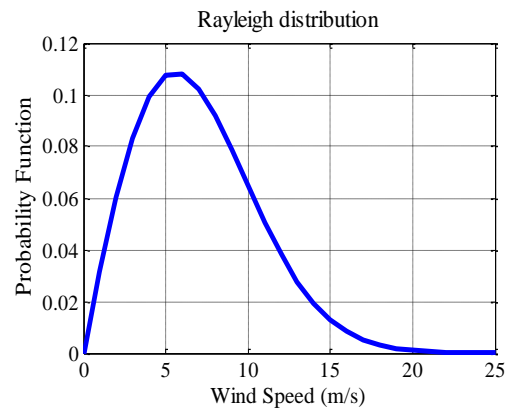
در این رابطه B_{bi} حداکثر چگالی شار یوغ، k_{st} ضریب انباشت ورقه هسته و P تعداد کل قطب‌های ماشین است. محاسبه عرض دندانه استاتور نیز مطابق رابطه زیر است [۹، ۱۵] که در آن Q تعداد شیار استاتور و B_t حداکثر چگالی شار در دندانه‌ها است. شایان ذکر است ابعاد شیار نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

که \bar{v} متوسط سرعت باد در یک مزرعه بادی است. تابع توزیع رایلی برای این مطالعه در شکل (۲) مشاهده می‌شود. انرژی تحویلی سالیانه به شبکه با ژنراتور طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۳، ۱۸]:

$$AEOG = 24 \times 365 \int_{v_i}^{v_o} \eta_{gen}(v) \cdot P_T(v) \cdot f(v) dv \quad (3)$$

$$= 8760 \sum_{j=1}^n \eta_{gen}(v_j) \cdot P_T(v_j) \cdot f(v_j) \Delta v$$

که در این رابطه η_{gen} راندمان الکتریکی ژنراتور و Δv میزان تغییرات سرعت باد است.



شکل (۲): نمودار تغییرات تابع چگالی احتمال برای میانگین سرعت باد ۷ متر بر ثانیه

۳-۲- مدل سازی هندسی

در این قسمت، محاسبه ابعاد اصلی ژنراتور بررسی شده است. ابعاد ژنراتور آهنربای دائم رتور خارجی با آهنربای سطحی در شکل (۳) نمایش داده شده است. نخستین گام در طراحی ژنراتور، محاسبه توان الکتریکی خروجی P_{out} به صورت تابعی از ابعاد اصلی ماشین یعنی قطر خارجی استاتور (D) و طول ماشین (L) است [۳، ۹، ۱۹]:

$$P_{out} = \frac{1}{k_e} S_g \cos \varphi \quad (4)$$

$$S_g = 0.5 \pi^2 k_w n_r D^2 L A_m B_{mg1} \quad (5)$$

که در روابط فوق S_g توان ظاهری فاصله هوایی، k_e نسبت ولتاژ القایی به ولتاژ ترمینال، k_w ضریب سیم‌پیچی، n_r سرعت سنکرون (دور بر ثانیه) و A_m حداکثر بارگذاری الکتریکی بر حسب آمپر بر متر است. $\cos \varphi$ نیز ضریب توان

زیر بیان کرد:

$$L_s = L_m + L_l \quad (۱۳)$$

در رابطه فوق L_l اندوکتانس پراکندگی بوده که به پارامترهای متعددی وابسته است. نحوه محاسبه اندوکتانس پراکندگی به تفصیل در [۱۹] شرح داده شده است. در ماشین‌های آهنربای دائم با آهنربای سطحی تلفات هسته رتور صرف نظر شدنی بوده است؛ بنابراین، تلفات هسته یوغ و دندانه استاتور مطابق رابطه زیر خواهد بود [۶،۱۱]:

$$P_{Fe} = 2m_{Fe} \rho_h \frac{f}{f_{base}} \left(\frac{B_{Fe}}{B_{base}} \right)^2 + 2m_{Fe} \rho_e \left(\frac{f}{f_{base}} \right)^2 \cdot \left(\frac{B_{Fe}}{B_{base}} \right)^2 \quad (۱۴)$$

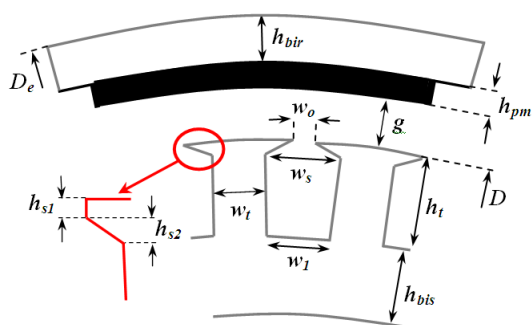
که ρ_e و ρ_h به ترتیب تلفات مخصوص هیستریزس و جریان گردابی (وات بر کیلوگرم) در فرکانس f_{base} و چگالی شار B_{base} هستند. f فرکانس نامی ماشین، B_{Fe} حداکثر چگالی شار در دندانه یا یوغ استاتور و m_{Fe} وزن دندانه‌ها یا یوغ استاتور است. جنس هسته از نوع m-19 بوده که مشخصات کامل آن در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): مشخصات ژنراتور، هسته و ابعاد ثابت شیار

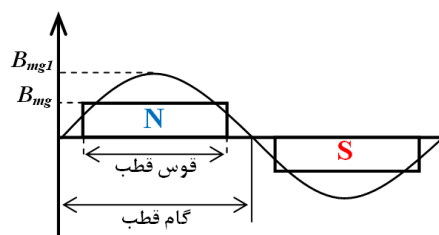
پارامترها	واحد	مقدار
توان خروجی الکتریکی	kW	۷۵۰
ولتاژ نامی خط	v	۴۰۰
سرعت نامی محور	rpm	۲۸/۶
f_{base}	Hz	۵۰
B_{base}	T	۱/۵
ρ_h	W/kg	۲
ρ_e	W/kg	۰/۵
h_{s1}	mm	۱
h_{s2}	mm	۴
w_o	mm	۳

۳-۴- مدل سازی الکتریکی

در این قسمت، مدار معادل الکتریکی و دیاگرام برداری ژنراتور آهنربای دائم با آهنربای سطحی و همچنین روابط اساسی به منظور تحلیل رفتار الکتریکی ژنراتور بررسی می‌شود. مدار معادل الکتریکی و دیاگرام برداری ژنراتور در شکل (۵) نمایش داده شده‌اند. با مراجعه به این شکل، ولتاژ



شکل (۳): نمایش ابعاد ماشین آهنربای دائم با رتور خارجی



شکل (۴): نمایش توزیع چگالی شار فاصله هوایی در حالت ایدئال

۳-۳- مدل سازی مغناطیسی

در این بخش، نحوه محاسبه شار پیوندی هر فاز، ولتاژ القایی، اندوکتانس سنکرون و تلفات هسته بررسی می‌شود. نخستین گام در محاسبه ولتاژ القایی و اندوکتانس سنکرون، محاسبه شار پیوندی هر فاز است. محاسبه شار پیوندی براساس یک مدل مغناطیسی دقیق از ماشین است. به طور خلاصه، شار پیوندی هر فاز در حالت ماندگار طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۱۵،۱۹]:

$$\Psi_m = \mu_0 \frac{8L_p \tau_p (k_w N_{ph})^2}{\pi^2 \cdot P \cdot g_{eff}} \sqrt{2} I_{ph} \quad (۱۰)$$

که μ_0 ضریب نفوذ مغناطیسی خلاء، N_{ph} تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز، τ_p گام قطب و I_{ph} جریان مؤثر هر فاز است. با داشتن شار پیوندی، ولتاژ القایی طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۱۵،۲۱،۲۲]:

$$E_{ph} = \frac{\pi \cdot P \cdot n_r \cdot \Psi_m \cdot k_w}{\sqrt{2}} \quad (۱۱)$$

اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی هر فاز طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵،۱۹]:

$$L_m = \frac{\Psi_m}{\sqrt{2} I_{ph}} \quad (۱۲)$$

حال می‌توان اندوکتانس سنکرون را به صورت رابطه

فراهم کردن مواد مصرفی و غیره تأثیر می‌گیرد. تمامی اینها به همراه هزینه ساختمان ژنراتور در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند؛ بنابراین، هزینه ساخت ژنراتور طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$C_g = C_{act} + C_{str} \quad (20)$$

که C_{act} هزینه مواد اولیه و به‌کارگیری آنها و C_{str} هزینه ساختمان ژنراتور است. هزینه مواد اولیه به‌صورت رابطه زیر است [۱۹]:

$$C_{act} = k_N (C_w + C_c + C_{PM} + C_{sh}) \quad (21)$$

در رابطه بالا ضریب k_N وابسته به تعداد ماشین‌های ساخته‌شده در سال است که همواره کمتر یا مساوی یک خواهد بود. از آنجایی که اطلاعاتی درباره تعداد ژنراتورهای ساخته‌شده در طول یک سال نداریم، این ضریب برابر با یک فرض می‌شود. C_w ، C_c ، C_{PM} و C_{sh} به‌ترتیب هزینه سیم‌پیچی، هزینه هسته، هزینه آهنربای دائم و هزینه شفت است. هزینه سیم‌پیچی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_w = k_{fill} \cdot k_{ii} \cdot k_{sr} \cdot m_{cu} \cdot c_{cu} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، k_{fill} ضریب پرشدگی شیار استاتور و k_{ii} ضریب هزینه ساخت کلاف با در نظر گرفتن هزینه قرارداد کلاف داخل شیار، عایق کاری و غیره است. k_{sr} نسبت هزینه سیم‌پیچی استاتور و رتور به هزینه سیم‌پیچی استاتور (در صورت وجود سیم‌پیچی میراکننده در رتور) است. به دلیل حذف سیم‌پیچی رتور و استفاده از ماده آهنربای دائم، این ضریب برابر یک خواهد بود. m_{cu} و c_{cu} به‌ترتیب وزن مس مصرفی (کیلوگرم) و هزینه مخصوص مس (دلاربرکیلوگرم) است. هزینه هسته مطابق با رابطه زیر حساب می‌شود:

$$C_c = k_p \cdot k_u \cdot k_{st} \cdot k_{ss} \cdot m_c \cdot c_c \quad (23)$$

که ضریب k_p به‌منظور در نظر گرفتن هزینه قسمت‌هایی از ژنراتور بوده که به ابعاد هسته استاتور وابسته است. k_u ضریب به‌کارگیری هسته الکترومغناطیسی و k_{ss} ضریب هزینه پرس کردن ورقه‌های هسته است. m_c و c_c به‌ترتیب وزن کل و هزینه مخصوص هسته آهنی است. محاسبه هزینه ماده آهنربای دائم طبق رابطه زیر خواهد بود:

القایی هر فاز ژنراتور به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\vec{E}_{ph} = \vec{V}_{ph} + (R_{ph} + j\omega L_s) \cdot \vec{I}_{ph} \quad (15)$$

که E_{ph} ولتاژ القایی فازی، V_{ph} ولتاژ ترمینال فازی، R_{ph} مقاومت الکتریکی هر فاز و ω نیز فرکانس زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه است. جریان مؤثر هر فاز نیز برابر است با:

$$I_{ph} = \frac{P_{out}}{\sqrt{3} V_{ph} \cos \phi} \quad (16)$$

حال تلفات مسی ژنراتور طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

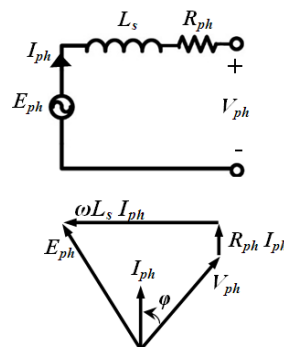
$$P_{cu} = 3 R_{ph} I_{ph}^2 \quad (17)$$

در پایان کل تلفات ژنراتور ΔP و راندمان الکتریکی

η_{gen} آن به‌صورت روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\Delta P = P_{Fe} + P_{cu} + 0.005 P_m \quad (18)$$

$$\eta_{gen} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} \quad (19)$$



شکل (۵): مدار معادل الکتریکی و دیاگرام برداری ژنراتور آهنربای دائم

۳-۵- مدل‌سازی اقتصادی

در این مطالعه، تمامی هزینه‌های مربوط به سیستم توربین بادی اعم از هزینه ساخت ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، تجهیزات جانبی الکتریکی و همچنین هزینه برج توربین بادی لحاظ شده است. محاسبه هزینه ساخت یک ماشین الکتریکی از عوامل متعددی از قبیل تعداد ماشین‌های ساخته‌شده در یک سال، سطح به‌کارگیری تکنولوژی در ساخت، سازماندهی فرآیند تولید، هزینه نیروی کار، هزینه

جدول (۳): پارامترهای محاسبه هزینه ساخت سیستم ژنراتور

[۳,۱۹]

پارامترها	واحد	مقدار
هزینه مخصوص هسته	\$/kg	۲/۶۲
هزینه مخصوص آهنربای دائم	\$/kg	۲۲۰/۳۱
هزینه مخصوص مس	\$/kg	۹/۶۱
هزینه مخصوص شفت فولادی	\$/kg	۰/۶۵
هزینه ساختمان ژنراتور مرجع	\$	۳۲۵۰
هزینه مبدل الکترونیک قدرت	\$/kg	۴۵/۲
هزینه تجهیزات جانبی الکتریکی	\$/kg	۴۲/۹۴
k_{fill}	-	۰/۶
k_{ii}	-	۲
k_{sr}	-	۲
k_p	-	۱/۶۲
k_u	-	۱/۳
k_{st}	-	۰/۹۷
k_{ss}	-	۱/۴
k_{shPM}	-	۱/۱۵
k_{magn}	-	۱/۱
k_{ush}	-	۱/۹۴
k_m	-	۳/۱۵

۳-۶- روندنمای طراحی ژنراتور

به منظور نمایش مراحل طراحی ژنراتور براساس مدل تحلیلی، روندنمای طراحی در شکل (۶) ارائه شده است. با انتخاب مقادیر برای پارامترها و متغیرهای طراحی، سرعت و توان محور توربین بادی محاسبه می‌شوند که برای شروع روند طراحی بسیار مهم است. سپس ابعاد بخش‌های مختلف ژنراتور طبق مدل هندسی محاسبه می‌شوند. این پارامترها برای محاسبه مدل الکتریکی و مغناطیسی نیز بسیار مهم‌اند. براساس مدل الکتریکی و مغناطیسی، ولتاژ ترمینال و چگالی شار فاصله هوایی بررسی می‌شود. اگر بررسی انجام شده پذیرفته نشود، مقادیر متغیرهای طراحی به روزرسانی و طراحی از ابتدا شروع می‌شود. در صورت پذیرفته شدن مقدار متغیرها، روند طراحی ادامه می‌یابد و هزینه ساخت سیستم توربین بادی، راندمان و انرژی تحویلی سالیانه به شبکه محاسبه خواهند شد.

$$C_c = k_{shPM} \cdot k_{magn} \cdot m_{PM} \cdot c_{PM} \quad (24)$$

در رابطه (۲۴) ضریب k_{shPM} برای در نظر گرفتن افزایش هزینه ساخت ماده آهنربای دائم به دلیل پیچیدگی شکل آن اعمال شده است. ضریب هزینه مغناطیس کردن ماده آهنربای دائم است. m_{PM} و c_{PM} به ترتیب وزن کل و هزینه مخصوص ماده آهنربای دائم است. محاسبه هزینه شفت به صورت رابطه زیر است:

$$C_{sh} = k_{ush} \cdot k_m \cdot m_{sh} \cdot c_{sh} \quad (25)$$

که k_{ush} ضریب بهره‌برداری شفت فولادی گرد، k_m ضریب هزینه ماشین‌کاری شفت، m_{sh} و c_{sh} نیز به ترتیب وزن شفت و هزینه مخصوص فولادند. هزینه ساختمان ژنراتور به صورت تابعی از قطر خارجی و طول ژنراتور طبق رابطه زیر تخمین زده می‌شود [۷,۲۲]:

$$C_{str} = 0.5 c_{str} \left[\left(\frac{D_e}{D_{ref}} \right)^3 + \left(\frac{L}{L_{ref}} \right)^3 \right] \quad (26)$$

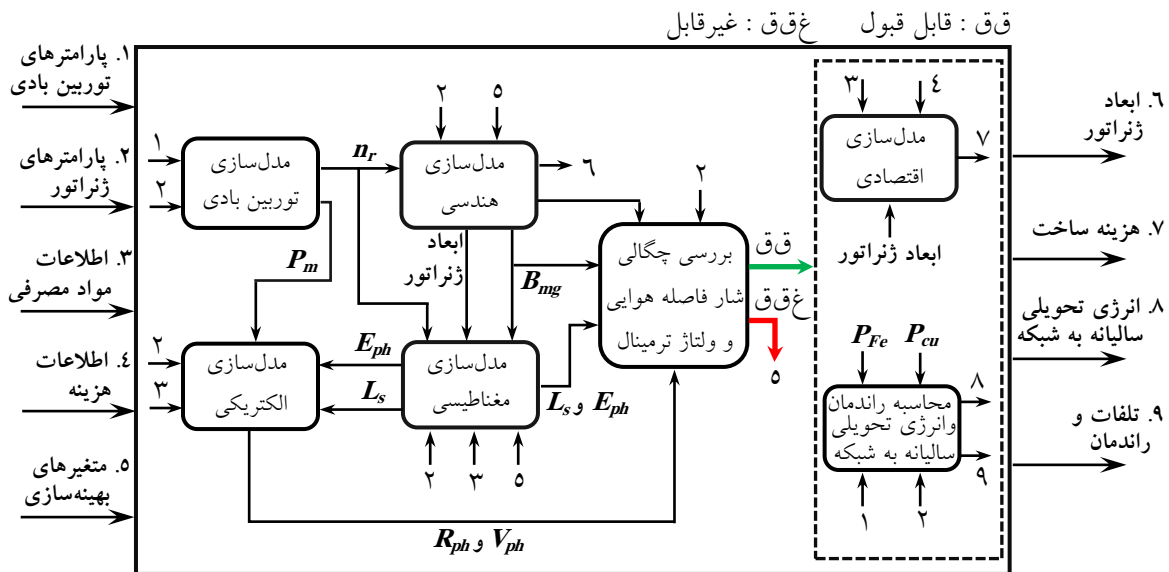
که c_{str} هزینه مخصوص ساختمان یک ماشین مرجع با قطر ۱ متر و طول ۰/۳ متر است. D_{ref} و L_{ref} به ترتیب قطر و طول ماشین مرجع است. محاسبه هزینه مبدل الکترونیک قدرت C_{pec} و همچنین هزینه تجهیزات جانبی الکتریکی C_{sub} اعم از کابل‌ها، ترانسفورماتور، سوئیچگیر و غیره به صورت تابعی از توان نامی ژنراتور تخمین زده می‌شود. به منظور محاسبه هزینه احداث برج توربین بادی، در ابتدا باید وزن کلیه تجهیزات در بالای برج اعم از وزن پرها و محفظه تجهیزات توربین بادی و همچنین وزن ژنراتور بر حسب کیلوگرم تخمین زده شود [۲۳]:

$$m_{top} = 9.0674 \cdot D^{2.1345} \quad (27)$$

که D قطر پره‌های توربین بادی است. حال با داشتن وزن تجهیزات بالای برج می‌توان طبق رابطه زیر هزینه ساخت برج توربین بادی (بر مبنای هزار دلار) را محاسبه کرد [۱۱]:

$$C_{tower} = 0.0022 m_{top} + 66.64 \quad (28)$$

تمامی پارامترهای لازم برای محاسبه هزینه ساخت سیستم ژنراتور در جدول (۳) مشاهده می‌شوند.



شکل (۶): روندنمای طراحی ژنراتور براساس مدل طراحی مولتی فیزیک

۴- الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، روش جستجوی احتمالی است که ایده اصلی آن برگرفته از سیر تکامل در طبیعت بوده است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی فرگشتی مانند وراثت، جهش زیست‌شناسی و اصول انتخابی داروین برای یافتن مقدار بهینه استفاده می‌کند [۷]. از مزیت‌های الگوریتم ژنتیک مواردی همچون وابسته‌نبودن به نقطه شروع، نبود محدودیت برای تابع هدف مانند مشتق‌پذیری یا پیوستگی و حداقل احتمال به دام افتادن در بهینه محلی را نام برد. در این الگوریتم، هر یک از اعداد مربوط به متغیرهای مسئله، یک ژن شناخته می‌شود و هر کروموزوم نیز یک رشته از صفر و یک بوده است که متغیرهای مسئله را در بر خواهد گرفت. ژن‌ها تشکیل کروموزوم می‌دهند و چندین کروموزوم نیز در کنار هم تشکیل جمعیت خواهند داد.

آغاز فرآیند به این صورت است که ابتدا یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود و به ترتیب مراحل گزینش مجدد، جهش و تبادل ژنی روی این جمعیت انجام می‌شود. با گذشت زمان، کروموزوم‌های ضعیف‌تر حذف می‌شوند و جمعیتی با هدف تولید نسل بهتر ایجاد خواهد شد. در نسل‌های بعد، یک کروموزوم شرط نهایی تابع

برازش را احراز می‌کند و جواب بهینه حاصل می‌شود [۲۴].

۵- نتایج طراحی بهینه

همان‌طور که در ابتدای مقاله ذکر شد هدف از طراحی بهینه کاهش هزینه ساخت سیستم توربین بادی است. طراحی بهینه براساس یک مدل مولتی فیزیک پیشنهادی از ژنراتور و سیستم توربین بادی انجام شده که در بخش‌های قبل به تفصیل بحث شده است. یکی از مهم‌ترین مراحل بهینه‌سازی طراحی، انتخاب متغیرهای طراحی طبق خواسته مسئله، محدودیت‌ها و براساس یک معیار مناسب است. متغیرهای طراحی و محدوده تغییرات آنها در این مطالعه در جدول (۴) ارائه شده‌اند. با توجه به خواسته مسئله، تابع هدف برای بهینه‌سازی طبق رابطه زیر تعریف شده است:

$$C_{total} = C_g + C_{pec} + C_{sub} + C_{tower} \quad (29)$$

روند بهینه‌سازی هزینه ساخت سیستم توربین بادی در شکل (۷) نمایش داده شده که طی ۵۰ تکرار حداقل هزینه ۴۶۶/۳۲ هزار دلار حاصل شده است. همچنین مشخصات ژنراتور بهینه‌شده در جدول (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود محدودیت‌های طراحی اعم از بالابودن راندمان و غیره در زمان طراحی، رعایت و نتایج مطلوبی حاصل شده است. به‌منظور نشان‌دادن کارایی و مؤثربودن روش

طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دائم شارشعاعی با رتور خارجی برای کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده

[۳] کاهش و انرژی تحویلی سالیانه به شبکه نیز ۷۴ مگاوات ساعت افزایش یافته است. این دو ژنراتور در شکل (۸) مشاهده می‌شود. در شکل (۹) انرژی تحویلی سالیانه به شبکه ژنراتور به‌ازای سرعت‌های مختلف باد نمایش داده شده است.

پیشنهادی، ژنراتور بهینه‌شده در این مقاله با یک نمونه ژنراتور آهنربای دائم رتور داخلی بهینه‌شده در [۳] مقایسه شده است که در جدول (۵) نتایج این مقایسه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حجم و وزن کلی ژنراتور بهینه‌شده در این مقاله تقریباً به اندازه ۰/۸۲ متر مکعب و ۲۶۰ کیلوگرم در مقایسه با ژنراتور بهینه‌شده در

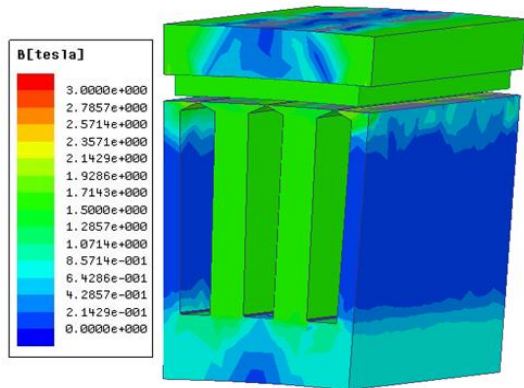
جدول (۴): معرفی متغیرهای بهینه‌سازی و نتایج طراحی بهینه

مقدار بهینه‌ابی شده	محدوده تغییرات		واحد	پارامترها
	حداکثر	حداقل		
۵۹۸۰۰	۶۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	A/m	حداکثر بارگذاری الکتریکی (A_m)
۱/۱۳۵	۱/۱۳۶	۰/۸۵۲	T	حداکثر چگالی شار فاصله هوایی (B_{mg})
۰/۸۹	۰/۹	۰/۶	-	نسبت قوس قطب به گام قطب (α_i)
۰/۱۳۹	۰/۵	۰/۱۴	-	نسبت طول به قطر داخلی استاتور
۱/۳۴	۱/۴	۱	-	نسبت ولتاژ القایی به ولتاژ ترمینال (ϵ)
۸۲	۱۴۷	۲۱	-	تعداد کل قطب (P)
۳/۴	۶	۳	A/mm ²	چگالی جریان
۱/۱۴	۱/۵	۱/۱	T	حداکثر چگالی شار یوغ استاتور (B_{bis})
۱/۵۹	۱/۶	۱/۳	T	حداکثر چگالی شار یوغ رتور (B_{bir})
۱/۶۷	۲	۱/۵	T	حداکثر چگالی شار دندانه استاتور (B_t)
۹۶۷	-	-	-	راندمان ژنراتور (η_{gen})
۳/۵۱	-	-	GWh	انرژی تحویلی سالیانه به شبکه (AEO_G)
۴۶۶۳۲	-	-	Thousand Dollar	هزینه ساخت
۵۳۷/۴	-	-	V	ولتاژ القایی خطی (E_{rms})
۱/۳۶	-	-	mH	اندوکتانس سنکرون (L_s)

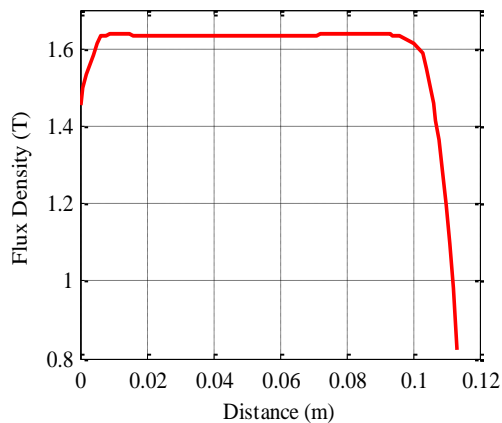
جدول (۵): مقایسه پارامترهای طراحی بهینه با ژنراتور بهینه‌شده در [۳]

ژنراتور مرجع [۳]	ژنراتور بهینه شده	واحد	پارامترها
۳/۴۴	۳/۵۱	GWh	انرژی تحویلی سالیانه به شبکه
۳/۹۱	۳/۰۹	mm ³	حجم کل ژنراتور
۳/۱۴	۲/۸۸	Ton	وزن کل ژنراتور
۲/۵۶	۲/۹۸	m	قطر خارجی استاتور (D)
۰/۶۹	۰/۴۱	m	طول ماشین (L)
۴۸/۵	۱۱۲/۰۴	mm	ارتفاع شیار (h_t)
۷/۶	۱۱/۲۷	mm	عرض شیار (w_s)
۹/۳	۲۶/۷۱	mm	عرض دندانه استاتور (w_t)
۱۲/۹	۳۷/۴۵	mm	ضخامت یوغ استاتور (h_{bis})
۸/۸	۸/۴	mm	ضخامت ماده آهنربای دائم (h_{pm})

شار در بخش‌های مختلف ماشین مطابق با محدودیت‌هایی است که در طراحی بهینه اعمال شده است.

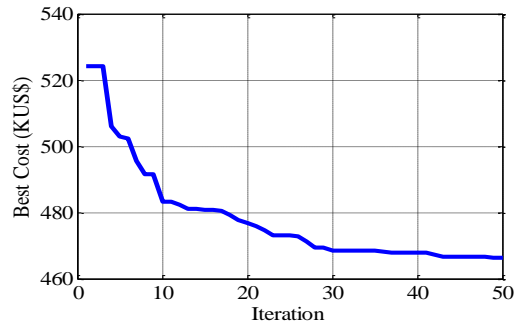


شکل (۱۰): توزیع چگالی شار مغناطیسی در بخش‌های مختلف ماشین

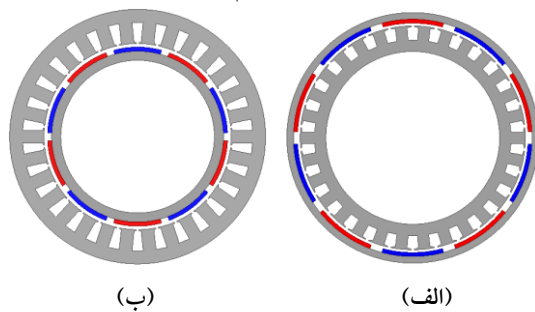


شکل (۱۱): تغییرات چگالی شار مغناطیسی در دندانه استاتور

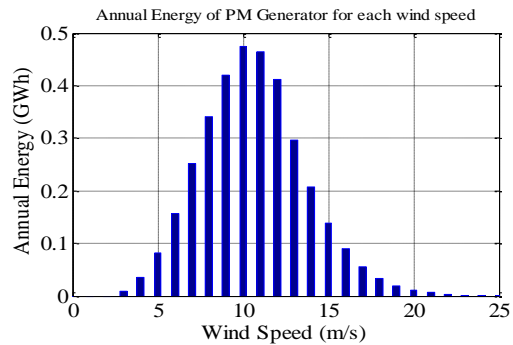
برای نمونه، تغییرات چگالی شار مغناطیسی دندانه استاتور براساس تحلیل اجزای محدود مطابق شکل (۱۱) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر مقدار چگالی شار مغناطیسی دندانه ۱/۶۴ تسلا اندازه‌گیری شده است؛ درحالی‌که حداکثر چگالی شار مغناطیسی دندانه در طراحی بهینه ۱/۶۷ تسلا محاسبه شده است؛ بنابراین، اختلاف کم مقدار محاسبه شده و مقدار اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی نشان‌دهنده دقت بالای روش طراحی ارائه شده است. این روند درباره چگالی شار یوغ استاتور و رتور نیز صادق



شکل (۷): روند بهینه‌سازی هزینه ساخت سیستم توربین بادی به‌واسطه الگوریتم ژنتیک



شکل (۸): (الف) ژنراتور آهنربای دائم با رتور خارجی (ب) ژنراتور آهنربای دائم رتور داخلی



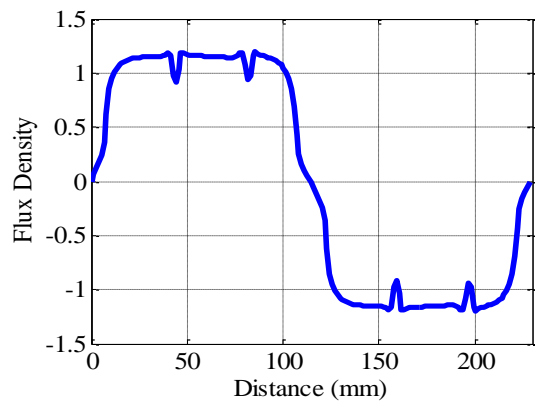
شکل (۹): انرژی تحویلی سالیانه به شبکه به‌ازای سرعت‌های مختلف باد

۶- تحلیل اجزای محدود

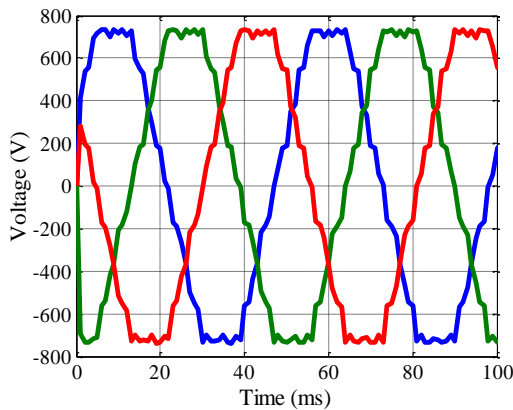
برای اعتبارسنجی نتایج طراحی بهینه از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود Ansoft-MAXWELL v.16 استفاده شده است. در شکل (۱۰)، توزیع چگالی شار مغناطیسی در قسمت‌های مختلف ژنراتور مشاهده می‌شود. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود چگالی

است.

چگالی شار فاصله هوایی ۱/۴ تسلا اندازه‌گیری شده است. تحلیل هارمونیک مربوطه در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگالی شار فاصله هوایی شامل طیف‌های هارمونیک مختلفی است که تنها مؤلفه اصلی آن بررسی می‌شود.

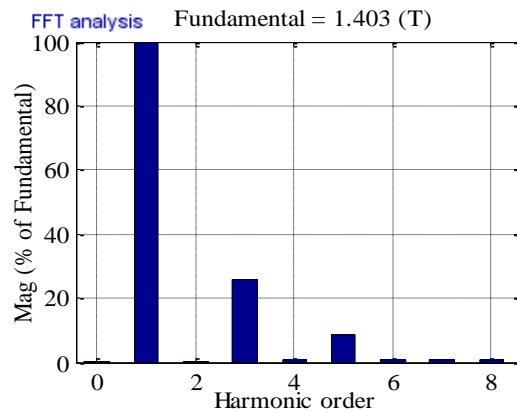


شکل (۱۲): شکل موج چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی

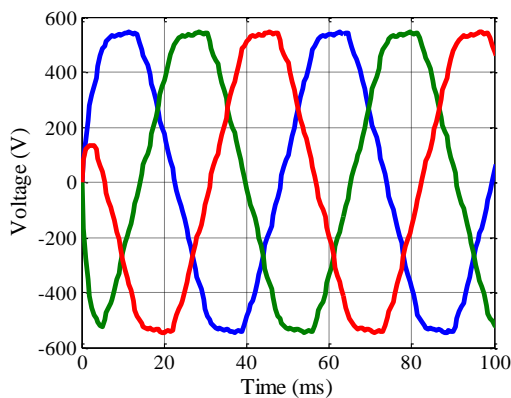


شکل (۱۴): شکل موج ولتاژ القایی خطی سه‌فاز ژنراتور

ولتاژ القایی خط هر سه‌فاز در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود. مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ القایی خط ۵۳۵/۸ ولت اندازه‌گیری شده است. اعوجاج هارمونیک کل آن ۵/۲۳ درصد است که کیفیت ولتاژ خوبی حاصل شده است. همان‌طور که در قسمت فرضیه‌های طراحی گفته شد پارامتر شیار بر قطب بر فاز ۱ در نظر گرفته شده است که اگر این مقدار افزایش می‌یافت، کیفیت ولتاژ القایی نیز بهتر می‌شد؛ اما به کاهش عرض دندانه استاتور و کاهش استحکام مکانیکی دندانه‌ها نیز منجر می‌شود. شایان ذکر است در ولتاژ القایی خط، هارمونیک سوم و مضارب آن حذف شده است. همچنین با اندازه‌گیری زمان تناوب، فرکانس ۱۹/۵۴ هرتز اندازه‌گیری شده است.



شکل (۱۳): طیف هارمونیک شکل موج چگالی شار فاصله هوایی



شکل (۱۵): شکل موج ولتاژ خطی سه‌فاز ژنراتور تحت بار

چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی برای دو گام قطب در شکل (۱۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع چگالی شار در فاصله هوایی به صورت سینوسی است. علت تغییرات دندانه‌ای شکل آن مربوط به قسمت شیار باز (W_o) است که به دلیل وجود فاصله هوایی بیشتر در این قسمت‌ها شاهد کاهش بیشتر شار مغناطیسی در این نواحی می‌باشیم. با مراجعه به روابط بخش مدل‌سازی هندسی و شکل (۴) مشاهده می‌شود محاسبه ابعاد اصلی ژنراتور و همچنین ولتاژ القایی براساس مؤلفه اصلی (هارمونیک اول) چگالی شار فاصله هوایی است؛ بنابراین، با استفاده از تحلیل فوریه باید حداکثر مقدار مؤلفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی B_{mg1} محاسبه شود؛ به همین منظور، با استفاده از آنالیز تبدیل فوریه در نرم‌افزار MATLAB، محتویات فرکانسی شکل موج چگالی شار فاصله هوایی استخراج می‌شود. حداکثر مقدار مؤلفه اصلی

یک فیلتر عمل می‌کند و باعث حذف یا تضعیف بسیاری از هارمونیک‌ها به‌ویژه هارمونیک‌های مرتبه بالا خواهد شد. مقایسه بین نتایج طراحی بهینه و نتایج تحلیل اجزای محدود در جدول (۶) ارائه شده که دقت بالای طراحی بهینه انجام شده و مؤثر بودن روش تحلیلی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

نامی

در شکل (۱۵) ولتاژ ترمینال خط ژنراتور تحت بار نامی نمایش داده شده است. مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ خط تحت بار نامی ۳۹۶/۵ ولت اندازه‌گیری شده که اعوجاج هارمونیک کل آن ۳/۳۱ درصد است. علت پایین بودن اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ ترمینال در مقایسه با ولتاژ القایی این است که راکتانس سنکرون ژنراتور همانند

جدول (۶): مقایسه نتایج حاصل از طراحی بهینه و تحلیل اجزای محدود

پارامتر	واحد	نتایج طراحی بهینه	نتایج تحلیل اجزای محدود	درصد خطا
حداکثر مقدار مؤلفه اصلی چگالی شار فاصله هوایی	T	۱/۴۳	۱/۴	۲/۱
مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ القایی خط	V	۵۳۷/۴	۵۳۵/۸	۰/۳
مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ خط در بار نامی	V	۴۰۰	۳۹۶/۵	۰/۸۷
توان خروجی ژنراتور	w	۷۵۰۰۰۰	۷۳۷۴۲۶	۱/۶۷
تلفات هسته	w	۶۰۰۱/۶	۵۹۲۷/۸	۱/۲۳
راکتانس سنکرون	mH	۱/۳۶	۱/۳۵۴	۴/۴
حداکثر چگالی شار یوغ استاتور	T	۱/۱۴	۱/۱	۳/۵
حداکثر چگالی شار یوغ رتور	T	۱/۵۹	۱/۵۷	۱/۲۶
حداکثر چگالی شار دندانه استاتور	T	۱/۶۷	۱/۶۴	۱/۸

وزن کمتر و انرژی تحویلی سالیانه به شبکه بیشتری است. این برتری، گواه بر مؤثر بودن روش پیشنهادی در این مطالعه است. در پایان به کمک تحلیل اجزای محدود، نتایج طراحی بهینه بررسی و تأیید شده است.

مراجع

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC). Global Wind Report: Annual Market Update [Online]. Available: <https://gwec.net/51-3-gw-of-global-wind-capacity-installed-in-2018/>, 2018.
- [2] S. Lee, Y. Kim, K. Lee and S. Kim, "Multiobjective Optimization Design of Small-Scale Wind Power Generator With Outer Rotor Based on Box-Behnken Design," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 4, pp. 605-609, June 2016.
- [3] H. Li, Z. Chen and H. Polinder, "Optimization of Multibrid Permanent- Magnet Wind Generator Systems," IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 24, No. 1, pp. 82-92, March 2009.
- [4] A. Grauers, "Design of Direct-Driven Permanent-Magnet Generators for Wind Turbines," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Chalmers Univ. Technol., Goteberg, Sweden, 1996.
- [5] J. Chen, C.V. Nayar, and L. Xu, "Design and Finite-Element Analysis of an Outer-Rotor Permanent-Magnet Generator for Directly Coupled Wind Turbines," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 36,

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی بهینه یک ژنراتور ۷۵۰ کیلووات آهنربای دائم با رتور خارجی برای کاربرد در توربین بادی بدون جعبه‌دنده انجام شده است. هدف از طراحی بهینه کاهش هزینه ساخت سیستم توربین بادی است. به همین منظور، ابتدا یک مدل تحلیلی مولتی‌فیزیک از ژنراتور و توربین بادی، استخراج و ارائه شده است. مدل تحلیلی شامل مدل انرژی باد، هندسی، مغناطیسی، الکتریکی و اقتصادی است که به نحو دقیقی مدل‌سازی هر یک از این بخش‌ها صورت گرفته است. در مدل‌سازی اقتصادی، تمام هزینه‌های مرتبط با ساخت سیستم توربین بادی اعم از هزینه ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، تجهیزات جانبی الکتریکی و همچنین هزینه ساخت برج توربین بادی محاسبه شده است. سپس متغیرهای طراحی و محدوده تغییرات آنها مشخص شده و با توجه به هدف مطالعه، به کمک الگوریتم ژنتیک طراحی انجام شده است. مقایسه انجام شده با یک نمونه ژنراتور آهنربای دائم رتور داخلی نشان می‌دهد ژنراتور بهینه‌شده در این مقاله دارای حجم و

- Magnet Synchronous Generators," IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 33, No. 2, pp. 652 - 659, June 2018.
- [15] J. Pyrhönen, T. Jokinen and V. Hrabovcová, "Design of Rotating Electrical Machines", 1 ed., U.K: Wiley, 2009.
- [16] A. Khan and P. Pillay, "Design of a PM Wind, Optimized for Energy Capture over a Wide Operating Range," IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, pp. 1501-1506, May 2005.
- [17] A. Shafie, B. M. Dehkordi, S. Farhangi and A. Kiyoumarsi, "A Fuzzy Logic Controller for IPMSG used in Wind Energy Conversion System," Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 35-50, July 2016.
- [18] M. A. Khan, "Contributions to Permanent Magnet Wind Generator Design Including the Application of Soft Magnetic Composites," Ph.D. dissertation, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, 2006.
- [19] J. F. Gieras, "Permanent Magnet Motor Technology, Design and Applications", 3rd ed. New York: CRC Press.
- [20] I. Boldea, "Variable Speed Generators", 1st ed., New York: CRC Press, 2005.
- [21] S. A. Taher, M. R. Shibani and G. Lalehzar, "Optimization of BLDC Motor using the Pareto Method Based on SOA," Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 55-65, August 2015.
- [22] T. P. M. Bazzo, J. F. Kolzer, R. Carlson, F. Wurtz, and L. Gerbaud, "Multidisciplinary Design Optimization of Direct-Drive PMSG Considering The Site Wind Profile," Electric Power Systems Research, Vol. 141, pp. 467-475, December 2016.
- [23] P. Jamieson, "Upscaling of Wind Turbine System in Innovation in Wind Turbine Design", 1st ed. Chichester, UK: Wiley, 2011.
- [24] G.F. Uler, O. A. Mohammed, Ch. S. Koh, "Design Optimization of Electrical Machines Using Genetic Algorithms," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 31, No. 3, pp. 2008-2011, May 1995.
- No. 5, pp. 3802-3809, September 2000.
- [6] H. Polinder, F. Pijl, G. Vilder and P. Tavner, "Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines," IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 23, No. 3, pp. 725- 733, September 2006.
- [7] H. Li and Z. Chen, "Design Optimization and Site Matching of Direct-Drive Permanent Magnet Wind Power Generator Systems," Renewable Energy, Vol. 34, No. 4, pp. 1175-1184, April 2009.
- [8] J. H. J. Potgieter and M. J. Kamper, "Torque and Voltage Quality in Design Optimization of Low-Cost Non-Overlap Single Layer Winding Permanent Magnet Wind Generator," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 5, pp. 2147-2156, May 2012.
- [9] J. Tapia, J. Pyrhönen, J. Puranen, P. Lindh and S. Nyman, "Optimal Design of Large Permanent Magnet Synchronous Generators," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 49, No. 1, pp. 642-650, January 2013.
- [10] S. Alshibani, V.G. Agelidis, R. Duta, "Lifetime Cost Assessment of Permanent Magnet Synchronous Generators for MW Level Wind Turbines," IEEE Transaction on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 1, pp. 10-17, January 2014.
- [11] A. McDonald and N. Bhuiyan, "On the Optimization of Generators for Offshore Direct Drive Wind Turbines," IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 32, No. 1, pp. 348-358, March 2017.
- [12] V. Puri, Y. K. Chauhan, N. Singh, "A Comparative Design Study and Analysis of Inner and Outer Rotor Permanent Magnet Synchronous Machine for Power Generation in Vertical Axis Wind Turbine Using GSA and GSA-PSO," Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 23, pp. 136-148, October 2017.
- [13] T. P. M. Bazzo, J. F. Kolzer, R. Carlson, F. Wurtz, and L. Gerbaud, "Multiphysics Design Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Generator," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 12, pp. 9815 - 9823, December 2017.
- [14] P. Asef, R. B. Perpiñà, M. R. Barzegaran, A. Laphorn and D. Mewes, " Multiobjective Design Optimization Using Dual-Level Response Surface Methodology and Booth's Algorithm for Permanent