

طراحی بهینه ژنراتور سنکرون آهنربای دایم شار شعاعی شش فاز جهت استفاده در توربین‌های بادی مقیاس کوچک

محمدابراهیم مؤذن، سیداصغر غلامیان و میثم جعفری نوکندی

جعبه‌دنده می‌توان به مواردی چون افزایش بازدهی و کاهش حجم کلی سیستم، قابلیت اطمینان بالا و کاهش هزینه تعمیر و نگهداری به دلیل حذف جعبه‌دنده اشاره کرد [۳] و [۴]. انواع مختلفی از ژنراتورها را می‌توان در توربین‌های بادی مورد استفاده قرار داد ولی ژنراتورهای آهنربای دایم به دلیل ساختمان ساده، راندمان، قابلیت اطمینان و چگالی توان بالا گزینه مناسبی برای استفاده در این نوع کاربرد می‌باشند [۳] و [۵].

تحقیقات زیادی به منظور بهبود عملکرد ژنراتورهای آهنربای دایم متصل به توربین‌های بادی انجام شده است. به عنوان نمونه در [۶]، مقایسه‌ای بین سه نوع سیستم توربین بادی شامل ژنراتور القایی سرعت ثابت با جعبه‌دنده، ژنراتور سنکرون سرعت متغیر با جعبه‌دنده و ژنراتور سنکرون آهنربای دایم بدون جعبه‌دنده بر اساس راندمان انجام شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که راندمان ژنراتور سنکرون آهنربای دایم بدون جعبه‌دنده بسیار بیشتر از دو سیستم دیگر می‌باشد. طراحی، تحلیل اجزای محدود و تست عملی یک ژنراتور آهنربای دایم برای استفاده در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده در [۷] ارائه شده است. تحلیل صورت‌گرفته نشان می‌دهد که ژنراتور در یک محدوده وسیع از تغییرات سرعت دارای عملکرد قابل اطمینان و بسیار خوب می‌باشد. در [۸] انرژی تحویلی سالیانه سه نوع ژنراتور متصل به توربین بادی شامل ژنراتور القایی دوسو تغذیه، ژنراتور سنکرون با تحریک خارجی و ژنراتور سنکرون آهنربای دایم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نشان داده شده که ژنراتور سنکرون آهنربای دایم بدون جعبه‌دنده دارای بیشترین انرژی تحویلی سالیانه به شبکه می‌باشد. در [۹] طراحی بهینه چندین ژنراتور آهنربای دایم با توان نامی و سرعت نامی متفاوت به منظور کاهش هزینه سیستم توربین بادی انجام شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که هرچند با افزایش توان و کاهش سرعت نامی ژنراتور، ابعاد و هزینه ساخت آن افزایش می‌یابد ولی چگالی گشتاور و نسبت گشتاور به هزینه آن بهتر خواهد شد. یک روش مؤثر به منظور بهبود ریبیل گشتاور و همچنین بهبود کیفیت ولتاژ ژنراتور سنکرون آهنربای دایم متصل به توربین بادی در [۱۰] ارائه شده است. عوامل مؤثر بر گشتاور دندانه‌ای و اعوجاج هارمونیک ولتاژ مانند قوس قطب، گام شیار و ارتفاع یوغ استاتور و رتور مورد مطالعه قرار گرفته و سپس با انتخاب مناسب این پارامترها بهبود ریبیل گشتاور و کیفیت ولتاژ القایی حاصل شده است. در [۱۱] یک روش بهینه‌سازی ریاضی ساده به نام ضریب لاگرانژ به منظور افزایش توان عبوری از فاصله هوایی یک ژنراتور سنکرون آهنربای دایم تحت محدودیت تنش مماسی ارائه شده است. در [۱۲] طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دایم متصل به توربین بادی به منظور کاهش گشتاور دندانه‌ای و اعوجاج هارمونیک کل ارائه شده است. در فرایند بهینه‌سازی، توان خروجی بالا نیز مد نظر قرار گرفته است. متغیرهای طراحی قوس قطب، ضخامت ماده آهنربای دایم و میزان قوس دندانه انتخاب شده و از توابع هدف مختلف به منظور رسیدن به طراحی بهینه استفاده شده است.

چکیده: در این مقاله طراحی بهینه ژنراتور سنکرون آهنربای دایم شش‌فاز جهت استفاده در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده ارائه شده است. ابعاد و هزینه ساخت زیاد و راندمان کم از معایب ژنراتورهای متصل به توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده به دلیل سرعت نامی پایین می‌باشد. بنابراین هدف اصلی این مقاله طراحی بهینه ژنراتور سنکرون آهنربای دایم بر اساس کاهش تلفات و هزینه ساخت ژنراتور است. به همین منظور ابتدا روابط حاکم بر طراحی ژنراتور سنکرون آهنربای دایم شار شعاعی مورد بررسی قرار گرفته و یک الگوریتم طراحی دقیق برای آن استخراج شده است. سپس با تعریف یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه، متغیرهای طراحی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در یک محدوده مناسب بهینه‌یابی شده و حداقل تلفات و هزینه ساخت ژنراتور به دست آمده است. در پایان مقایسه‌ای بین ژنراتور بهینه شده و یک نمونه ژنراتور آهنربای دائم رتور خارجی واقعی انجام شده است که نشان‌دهنده قابلیت‌های بسیار خوب روش طراحی بهینه ارائه شده می‌باشد. همچنین صحت طراحی بهینه انجام شده به واسطه تحلیل اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه: ژنراتور آهنربای دایم، توربین بادی، طراحی بهینه، هزینه ساخت، تلفات، الگوریتم ازدحام ذرات، تحلیل اجزای محدود.

۱- مقدمه

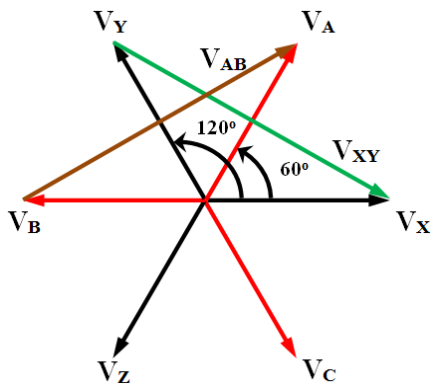
در سال‌های اخیر، توجه بیشتر به مشکلات زیست‌محیطی و همچنین اطمینان از تضمین امنیت انرژی در آینده موجب شده که بسیاری از دولت‌ها در سراسر جهان حمایت خود را به سمت بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر معطوف نمایند. در این میان استفاده از توربین‌های بادی به عنوان ساده‌ترین روش در بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، روند روبه‌رشدی داشته است. ظرفیت کل توربین‌های بادی نصب شده در جهان از حدود ۱۷ گیگاوات در سال ۲۰۰۰ به ۵۳۹ گیگاوات در سال ۲۰۱۷ رسیده است که نشان‌دهنده اهمیت موضوع می‌باشد [۱]. ضمن آن که استفاده از توربین‌های بادی مقیاس کوچک در مناطق دورافتاده که گسترش شبکه سراسری به آن مناطق توجیه اقتصادی ندارد به عنوان یک منبع انرژی مورد اطمینان گزینه مناسبی می‌باشد [۲]. توربین‌های بادی بر اساس نوع سیستم گرداننده شفت ژنراتور به دو نوع بدون جعبه‌دنده و با جعبه‌دنده تقسیم می‌شوند [۳]. از مزایای سیستم بدون

این مقاله در تاریخ ۱۲ خرداد ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۹ آبان ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

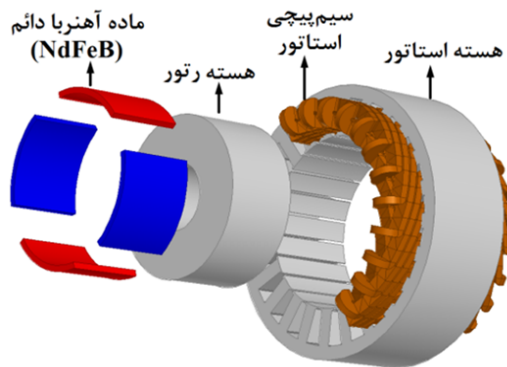
محمدابراهیم مؤذن، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، (email: m.moazzen@stu.nit.ac.ir).

سیداصغر غلامیان (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، (email: gholamian@nit.ac.ir).

میثم جعفری نوکندی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، (email: m.jafari@nit.ac.ir).



شکل ۲: نمایش دیاگرام برداری شش‌فاز ژنراتور.



شکل ۱: ساختمان ماشین آهنربای دایم شار شعاعی با آهنربای سطحی.

از انتشار خطا از یک گروه سه‌فاز به گروه دیگر و همچنین ممانعت از جاری شدن هارمونیک‌های مضرب سوم در ولتاژ و جریان خط، مرکز ستاره دو گروه سه‌فاز از یکدیگر جدا می‌باشند [۱۷].

۲-۱ محاسبه ابعاد اصلی ژنراتور

تعیین ابعاد قسمت‌های مختلف ماشین بر اساس مدار معادل مغناطیسی ماشین صورت می‌گیرد [۱۸]. در اولین گام از طراحی ماشین باید توان ظاهری فاصله هوایی را به صورت تابعی از ابعاد اصلی ماشین بیان نمود. توان ظاهری فاصله هوایی با توجه به ولتاژ و جریان القایی فازی به صورت رابطه زیر می‌باشد [۱۹]

$$S_g = mE_{ph} I_{ph} \quad (۱)$$

که در آن m تعداد فاز ماشین بوده و E_{ph} و I_{ph} به ترتیب مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ و جریان القایی هر فاز استاتور می‌باشند. مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ القایی بر حسب ابعاد اصلی ماشین به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۸] و [۱۱]

$$E_{ph} = \sqrt{2} k_{vn} N_{ph} \omega_m \frac{D}{\tau} LB_{mg} \quad (۲)$$

که k_{vn} ضریب سیم‌پیچی، N_{ph} تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز، D و L به ترتیب قطر داخلی و طول استاتور، ω_m سرعت زاویه‌ای محور رتور و B_{mg} حداکثر مقدار مؤلفه اول چگالی شار فاصله هوایی می‌باشد که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۳]

$$B_{mg} = \frac{4}{\pi} B_{mg} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} \alpha_i\right) \quad (۳)$$

در رابطه بالا B_{mg} حداکثر چگالی شار فاصله هوایی و α_i نسبت قوس قطب به گام قطب می‌باشد. برای تعیین ابعاد اولیه ماشین، B_{mg} بین ۰٫۶ تا ۰٫۸ چگالی شار پسماند ماده آهنربای دایم (B_r) انتخاب می‌شود [۱۹]. محدوده مناسب برای α_i نیز بین ۰٫۶ تا ۰٫۹ می‌باشد [۴]. درک بهتری از این دو پارامتر در شکل ۳ ارائه شده است. حال توان ظاهری فاصله هوایی را می‌توان بر حسب تابعی از ابعاد ماشین به صورت رابطه زیر نوشت [۱۱] و [۱۹]

$$S_g = \frac{1}{\tau} \pi^2 k_{vn} n_s D^2 L A_m B_{mg} \quad (۴)$$

که در آن n_s سرعت سنکرون (دور بر ثانیه) و A_m حداکثر بارگذاری الکتریکی بوده که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۹]

$$A_m = \frac{\tau m \sqrt{2} N_{ph} I_{ph}}{\pi D} \quad (۵)$$

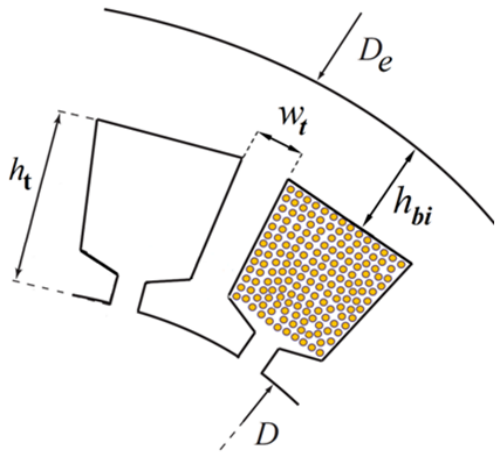
در [۱۳] طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دایم برای استفاده در توربین بادی به منظور کاهش هزینه تولید انرژی انجام شده است. برای طراحی ژنراتور از دو ماده آهنربای خاک کمیاب و آهنربای فریت به عنوان ماده آهنربای دایم استفاده شده است. برای رسیدن به یک طراحی مناسب چندین تابع هدف ارائه گردیده است. نشان داده شده که هزینه تولید انرژی و مواد مصرفی ژنراتور طراحی‌شده با آهنربای خاک کمیاب به مراتب کمتر از آهنربای فریت است. در [۱۴] طراحی بهینه یک ژنراتور آهنربای دایم برای استفاده در توربین‌های بادی با هدف کاهش هزینه ساخت انجام شده است. علاوه بر مدل ژنراتور، مدل تلفات و هزینه ساخت مبدل الکترونیک قدرت نیز در طراحی بهینه در نظر گرفته شده است. همچنین این نتیجه حاصل شده که کاهش زاویه فاز جریان ژنراتور منجر به کاهش هزینه ساخت کلی سیستم می‌شود.

ابعاد یک ماشین الکتریکی به طور عمده تحت تأثیر سرعت نامی آن می‌باشد به طوری که در زمان طراحی با کاهش سرعت نامی ابعاد ماشین افزایش خواهد یافت [۷] و [۱۱]. لذا ژنراتورهای متصل به توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده به دلیل سرعت نامی پایین ابعاد بزرگتری خواهند داشت و حجم کلی بالا، راندمان پایین و هزینه ساخت زیاد از معایب این نوع ژنراتورها می‌باشد. بنابراین هدف از طراحی بهینه در این مقاله کاهش تلفات و هزینه ساخت ژنراتور آهنربای دایم متصل به توربین بادی بدون جعبه‌دنده می‌باشد.

در این مقاله ابتدا روابط طراحی و محاسبه تلفات و هزینه ساخت ژنراتور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس با معرفی الگوریتم ازدحام ذرات و ارائه روندنمای طراحی، پارامترهای ژنراتور و متغیرهای بهینه‌سازی مشخص گردیده‌اند. در پایان طراحی بهینه و تأیید صحت آن توسط تحلیل اجزای محدود انجام شده و نتیجه‌گیری ارائه گردیده است.

۲- روابط طراحی ژنراتور آهنربای دایم

تا کنون ساختارهای مختلفی از ماشین‌های آهنربای دایم به منظور کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده ارائه شده است ولی ژنراتور آهنربای دایم شار شعاعی با آهنربای سطحی به دلیل ساختمان ساده، قابلیت اطمینان بالا و امکان تعبیه تعداد قطب بیشتر گزینه مناسبی برای این نوع کاربرد می‌باشد [۴] و [۹]. ساختمان این ژنراتور در شکل ۱ نمایش داده شده است. علت اصلی استفاده از ژنراتور شش‌فاز در این مقاله قابلیت اطمینان بالای آن در مقایسه با نوع سه‌فاز می‌باشد. از مزایای دیگر ماشین‌های چندفاز نسبت به نوع سه‌فاز ریپل گشتاور پایین، راندمان و چگالی گشتاور بالا می‌باشد [۱۵] و [۱۶]. شش‌فاز ماشین به دو دسته سه‌فاز به نام‌های XYZ و ABC تقسیم و نام‌گذاری شده‌اند. دیاگرام برداری شش‌فاز در شکل ۲ نمایش داده شده است. به منظور جلوگیری



شکل ۴: نمایش ابعاد هندسی استاتور ماشین آهنربای دایم.

$$h_{pm} = \frac{B_{mg} \mu_{rec} g_{eff}}{B_r} \quad (10)$$

که μ_{rec} ضریب نفوذپذیری ماده آهنربای دایم و g_{eff} طول مؤثر فاصله هوایی است که به صورت رابطه زیر حساب می‌شود [۳]

$$g_{eff} = k_c \left(g + \frac{h_{pm}}{\mu_{rec}} \right) \quad (11)$$

که در رابطه بالا k_c ضریب کارتر شیار استاتور و g طول فاصله هوایی می‌باشد.

۲-۴ محاسبه گشتاور دندانه‌ای

یکی از علت‌های اصلی ایجاد ریپل گشتاور در ماشین‌های آهنربای دایم گشتاور دندانه‌ای می‌باشد. گشتاور دندانه‌ای اثر متقابل بین شار مغناطیسی تولیدشده توسط آهنربای دایم و تغییر مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی به علت حضور شیارهای استاتور به وجود می‌آید [۱۲] و [۱۹]. گشتاور دندانه‌ای طبق رابطه زیر از نرخ تغییرات کل انرژی ذخیره‌شده در فاصله هوایی (W) نسبت به موقعیت زاویه‌ای رتور (θ) محاسبه می‌شود [۱۹]

$$T_{cog} = \frac{dW}{d\theta} \quad (12)$$

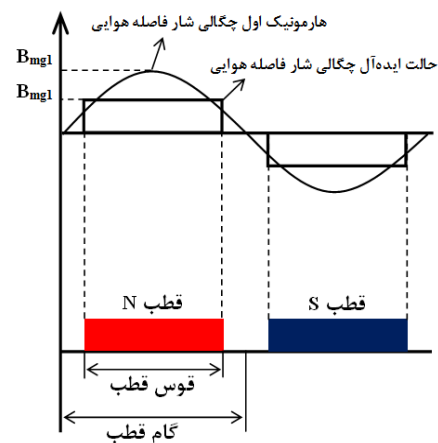
$$W = g \cdot L \int \frac{B_g^2(x)}{2\mu_0} dx \quad (13)$$

که $B_g(x)$ چگالی شار فاصله هوایی بر حسب محور x و μ ضریب نفوذپذیر خلأ می‌باشد.

۲-۵ محاسبه تلفات ژنراتور

تلفات ژنراتور شامل تلفات هسته، تلفات سیم‌پیچ و تلفات اضافی می‌باشد. در ماشین‌های آهنربای دایم با آهنربای سطحی تلفات هسته رتور قابل صرف نظر است [۱۹] و همچنین از تلفات اصطکاک و بادخوری به دلیل سرعت پایین صرف نظر شده است [۲۳]. تلفات هسته در یوغ و دندانه استاتور مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]

$$P_{Fe} = k_h m_{Fe} \rho_h \frac{f}{f_{base}} \left(\frac{B_{Fe}}{B_{base}} \right)^\gamma + k_e m_{Fe} \rho_e \left(\frac{f}{f_{base}} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{B_{Fe}}{B_{base}} \right)^\gamma \quad (14)$$



شکل ۳: نمایش توزیع چگالی شار فاصله هوایی و هارمونیک اول آن.

در پایان، ابعاد اصلی ژنراتور بر حسب تابعی از توان خروجی ژنراتور طبق روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد [۱۹]

$$D^2 L = \frac{P_{out} \cdot \epsilon}{n_s \sigma_p} \quad (6)$$

$$\sigma_p = \frac{1}{\sqrt{2}} A_m B_{mg} k_w \cos \phi \quad (7)$$

که P_{out} توان خروجی ژنراتور، ϵ نسبت ولتاژ القایی به ولتاژ ترمینال و σ_p ضریب خروجی می‌باشد. $\cos \phi$ ضریب توان بار است که برای ژنراتورهای آهنربای دایم متصل به مبدل‌های پشت به پشت، یک انتخاب می‌شود [۲۰]. با انتخاب یک نسبت مناسب بین طول استاتور و قطر داخلی آن می‌توان ابعاد اصلی ماشین را محاسبه نمود. نسبت مناسب طول به قطر داخلی استاتور ژنراتورهای آهنربای دایم شار شعاعی متصل به توربین‌های بادی بین ۰/۱۴ تا ۰/۵ گزارش شده است [۲۱].

۲-۲ محاسبه عرض دندانه و ضخامت یوغ

در ماشین‌های الکتریکی مسیر برگشت شار بین قطب‌ها از طریق دندانه‌ها و یوغ استاتور و رتور می‌باشد. لذا در این مسیرها نباید اشباع مغناطیسی رخ دهد و به همین جهت تعیین ابعاد این بخش از ماشین باید با دقت خاصی صورت گیرد. ضخامت یوغ استاتور و رتور به صورت تابعی از چگالی شار فاصله هوایی به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۱۱] و [۲۲]

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

در این رابطه B_{bi} حداکثر چگالی شار یوغ، k_{st} ضریب انباشت ورقه هسته و P عدد کل قطب‌های ژنراتور می‌باشد. عرض دندانه استاتور نیز مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱] و [۲۲]

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

که Q تعداد شیار استاتور و B_t حداکثر چگالی شار دندانه می‌باشد. ابعاد هندسی استاتور ماشین مورد نظر در شکل ۴ نمایش داده شده است.

۲-۳ محاسبه عرض دندانه و ضخامت یوغ

نوع ماده آهنربای دایم مورد استفاده در این مقاله NdFeB۳۵ با چگالی شار پسماند ۱/۲۳ تسلا می‌باشد. ضخامت ماده آهنربای دایم به منظور ایجاد چگالی شار مورد نیاز در فاصله هوایی طبق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۹]

به هسته استاتور و روتور و آهن مربوط به شفت ماشین. هزینه ساخت ژنراتور آهنربای دایم از طریق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۱۹]

$$C_t = k_N(C_w + C_c + C_{PM} + C_{sh}) \quad (17)$$

در رابطه بالا ضریب k_N وابسته به تعداد ماشین‌های ساخته شده در سال است که همواره کمتر یا مساوی یک می‌باشد. از آنجایی که اطلاعاتی در مورد تعداد ماشین‌های ساخته شده در سال نداریم این ضریب برابر با یک فرض می‌شود. C_w ، C_c ، C_{PM} و C_{sh} به ترتیب هزینه سیم‌پیچی، هزینه هسته، هزینه ماده آهنربای دایم و هزینه شفت بر حسب دلار آمریکا می‌باشند. هزینه مواد مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

۴- تخمین سرعت شفت ژنراتور

سرعت شفت ژنراتور به عنوان یکی از پارامترهای اولیه طراحی ژنراتور، نقش بسیار مهمی در تعیین ابعاد آن دارد [۷]. به منظور تخمین سرعت شفت ژنراتور ابتدا توان دریافتی از انرژی باد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در یک توربین بادی محور افقی، توان قابل استحصال از انرژی باد طبق رابطه زیر بیان می‌شود [۶] و [۲۴]

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho_{air} \pi R^2 u^3 \quad (18)$$

در این رابطه u سرعت باد، R شعاع نوک پره توربین و ρ_{air} چگالی هوا (۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشد. C_p بازده آیرودینامیکی توربین بادی است که بین ۰/۳ تا ۰/۴۵ گزارش شده است [۲۴]. سرعت زاویه‌ای محور توربین بادی (رادیان بر ثانیه) را که در واقع همان سرعت شفت ژنراتور است می‌توان بر حسب تابعی از توان خروجی ژنراتور به صورت رابطه زیر بیان کرد [۹] و [۲۴]

$$\omega_r = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} C_p \rho_{air} \pi \lambda^3 u^3 \eta_{gen}}{P_{out}}} \quad (19)$$

که در آن η_{gen} راندمان ژنراتور است که با توجه به نوع ژنراتور ۹۰٪ فرض می‌شود [۹]. λ نسبت سرعت نوک پره بوده که بین ۵ تا ۷ [۲۳] یا ۶ تا ۸ [۹] گزارش شده که مطابق با رابطه زیر است

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{u} \quad (20)$$

بر اساس نتایج به دست آمده از آمار ایستگاه‌های بادنجنی کشور، سرعت نامی باد در این مقاله ۱۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۲۵]. برای یک ژنراتور ۱۵ کیلووات با انتخاب $\lambda = 7$ و $C_p = 0.45$ ، سرعت نامی شفت ۱۵۰ دور بر دقیقه تخمین زده شده است.

۵- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ میلادی توسط ابره‌ه‌ارت و کندی ارائه گردید. این الگوریتم از رفتار گروهی پرندگان یا ماهی‌ها الهام گرفته و بر پایه هوش جمعی می‌باشد. در این الگوریتم هر پرنده یا ماهی به عنوان یک ذره شناخته می‌شود و هر ذره به عنوان یک پاسخ مسأله است. این الگوریتم در ابتدا با تعدادی ذره (npop) یا همان پاسخ شروع به کار می‌کند. هر کدام از ذرات دارای حافظه هستند، یعنی بهترین موقعیتی را که در فضای جستجو به آن می‌رسند به خاطر می‌سپارند. تغییر موقعیت و سرعت حرکت هر ذره در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خود و همسایگانش است [۲۶]. لذا سرعت حرکت

جدول ۱: مشخصات ژنراتور، هزینه مواد مصرفی و پارامترهای محاسبه تلفات.

مقدار	واحد	پارامترهای ژنراتور و ضرایب ثابت مشخصات ژنراتور
۱۵۰۰۰	وات	توان خروجی ژنراتور
۴۰۰	ولت	ولتاژ نامی خط
۱۵۰	دور بر دقیقه	سرعت نامی شفت ژنراتور
۲	-	شیار بر قطب بر فاز
$0.1 \times D$	میلی‌متر	طول فاصله هوایی
پارامترهای محاسبه تلفات هسته		
۵۰	هرتز	f_{base}
۱/۵	تسلا	B_{base}
۲	-	k_h برای یوغ استاتور
۱/۸	-	k_e برای یوغ استاتور
۱/۲	-	k_h برای دندانه استاتور
۲/۵	-	k_e برای دندانه استاتور
۲/۰۴	وات بر کیلوگرم	ρ_h
۰/۷۶	وات بر کیلوگرم	ρ_e
قیمت مواد مصرفی ماشین		
۲/۷۵	دلار بر کیلوگرم	هزینه هسته
۵/۵۵	دلار بر کیلوگرم	هزینه مس
۵۴/۵	دلار بر کیلوگرم	هزینه ماده آهنربای دایم
۰/۶۵	دلار بر کیلوگرم	هزینه شفت ژنراتور

که در رابطه بالا ρ_e و ρ_h به ترتیب تلفات هیستریزس و تلفات جریان گردابی مخصوص (وات بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شده در فرکانس f_{base} و چگالی شار B_{base} می‌باشند. f فرکانس نامی ژنراتور، B_{Fe} حداکثر چگالی شار در دندانه یا یوغ استاتور و m_{Fe} وزن دندانه‌ها یا یوغ استاتور می‌باشد. k_e و k_h به ترتیب ضرایب تجربی تلفات هیستریزس و جریان گردابی می‌باشند. مشخصات هسته به منظور محاسبه تلفات هسته در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین تلفات سیم‌پیچ ژنراتور به صورت رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد

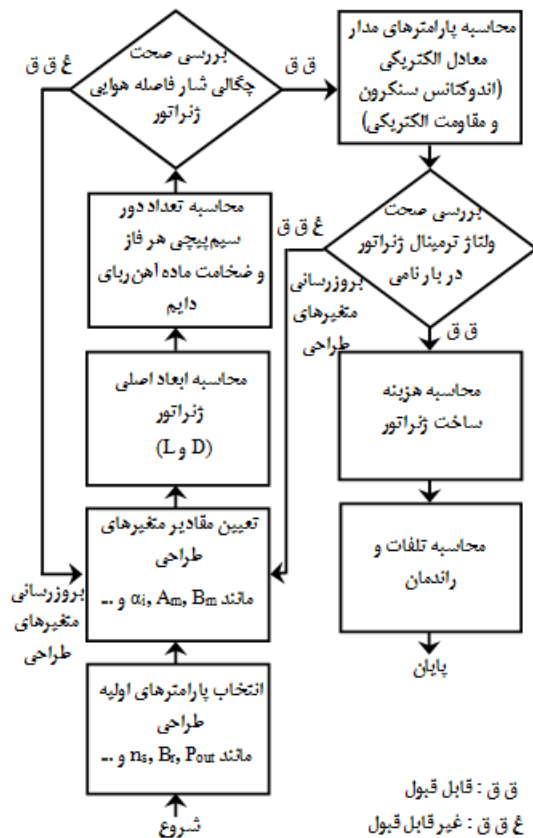
$$P_{cu} = m \frac{\rho_{cu} L_t N_{ph}}{a_s} I_{ph}^2 \quad (15)$$

که در آن m تعداد فاز، ρ_{cu} مقاومت مخصوص مس ($1/57 \times 10^{-6}$) اهم‌متر در $20^\circ C$ ، a_s سطح مقطع هادی و L_t طول یک دور کلاف می‌باشد. تلفات اضافه (P_{str}) معمولاً به صورت ضریبی از توان خروجی بیان می‌شود. تلفات اضافه را می‌توان برای ماشین شار شعاعی با آهنربای سطحی بین ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۰۰۱۵ توان خروجی در نظر گرفت که در این مقاله ۰/۰۰۱۵ انتخاب شده است [۲۲]. در پایان تلفات کل ژنراتور را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان نمود

$$P_{loss} = P_{cu} + P_{Fe} + P_{str} \quad (16)$$

۳- محاسبه هزینه ساخت ژنراتور

محاسبه هزینه ساخت یک ماشین الکتریکی تحت تأثیر عوامل متعددی از قبیل تعداد ماشین‌های ساخته شده در یک سال، سطح به کارگیری تکنولوژی در ساخت، سازماندهی فرایند تولید، هزینه نیروی کار، هزینه فراهم‌نمودن مواد مصرفی و غیره می‌باشد. در این مقاله طبق [۱۹] تمامی عوامل ذکر شده در محاسبه هزینه ساخت ژنراتور لحاظ شده‌اند. مواد مصرفی ماشین مورد نظر عبارتند از ماده آهنربای دایم، مس، آهن مربوط



شکل ۶: روندنمای طراحی ژنراتور سنکرون آهن‌برای داریم.

۶- مراحل طراحی ژنراتور

مراحل طراحی ژنراتور به صورت روندنما در شکل ۶ ارائه شده است.

۷- نتایج طراحی بهینه و مقایسه با یک نمونه واقعی

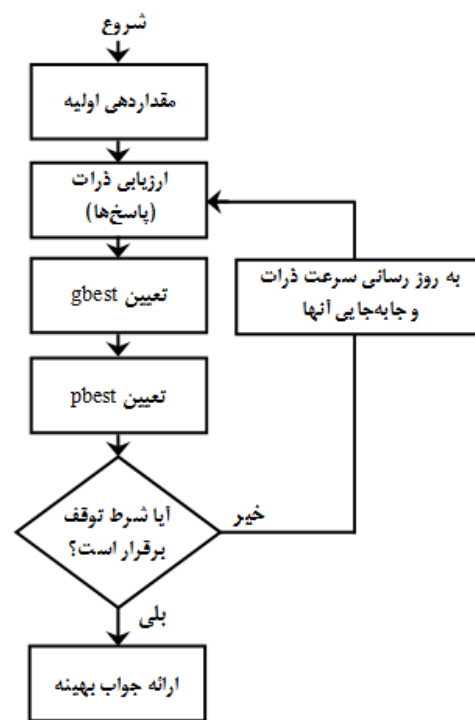
پارامترهای اصلی ژنراتور در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. محدوده فرکانس نامی برای یک ژنراتور آهن‌برای داریم کوچک متصل به توربین بادی بین ۸۰-۳۰ هرتز [۷] یا ۷۰-۱۰ هرتز [۲۱] گزارش شده است. بنابراین تعداد جفت قطب‌های ماشین به عنوان یکی از متغیرهای طراحی بین ۴ تا ۳۲ در نظر گرفته شده است. همچنین نسبت پهنای شیار به گام شیار به عنوان محدودیت طراحی بین ۰/۵ تا ۰/۶ انتخاب شده است [۲۸]. متغیرهای طراحی ژنراتور و محدوده تغییرات آنها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همان طور که قبلاً ذکر شد، هدف از طراحی بهینه کاهش تلفات و هزینه ساخت ژنراتور می‌باشد. بنابراین یک تابع هدف دومنظوره‌ای طبق رابطه زیر تعریف شده است

$$F_{obj} = \frac{P_{loss}}{P_{loss,ref}} + \frac{C_t}{C_{t,ref}} \quad (23)$$

که $P_{loss,ref}$ و $C_{t,ref}$ حداقل تلفات و هزینه ساخت ژنراتور می‌باشند. به منظور مشخص نمودن حداقل مقادیر تلفات و هزینه ساخت ژنراتور، ابتدا باید تلفات ژنراتور و هزینه ساخت آن به طور جداگانه بهینه‌سازی شوند. بهینه‌سازی تلفات ژنراتور طبق تابع هدف زیر انجام شده است

$$F_{loss} = P_{loss} \quad (24)$$

روند بهینه‌سازی تلفات ژنراتور در شکل ۷ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود حداقل تلفات ژنراتور ۴۳۳/۶۲ وات می‌باشد. بهینه‌سازی هزینه ساخت ژنراتور نیز طبق تابع هدف زیر انجام می‌شود



شکل ۵: روندنمای عملکرد الگوریتم ازدحام ذرات.

جدول ۲: متغیرهای طراحی ژنراتور و محدوده تغییرات آنها.

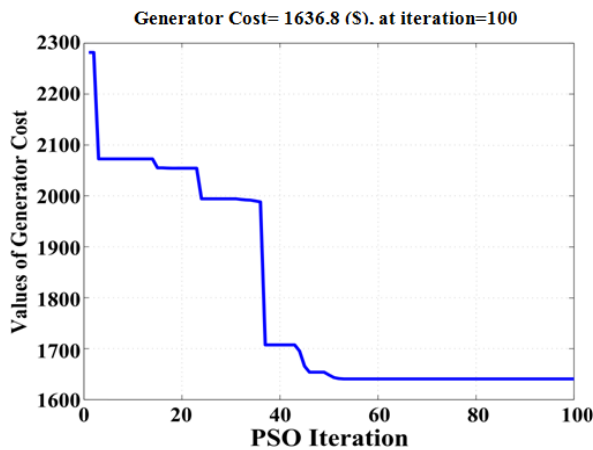
متغیرهای طراحی ژنراتور	واحد	محدوده تغییرات
حداکثر بارگذاری الکتریکی (A_m)	آمپر بر متر	۵۵۰۰-۱۰۰۰۰
حداکثر چگالی شار فاصله هوایی (B_{mg})	تسلا	۰/۷۳۸-۰/۹۸۴
نسبت قوس قطب به گام قطب (α_i)	-	۰/۶-۰/۹
نسبت طول به قطر داخلی استاتور (K_L)	-	۰/۱۴-۰/۵
نسبت ولتاژ القایی به ولتاژ ترمینال (ε)	-	۱-۱/۴
تعداد جفت قطب ($2P$)	-	۴-۳۲
چگالی جریان (j)	آمپر بر میلی‌متر مربع	۳-۶
حداکثر چگالی شار یوغ استاتور (B_{bis})	تسلا	۱/۱-۱/۵
حداکثر چگالی شار یوغ رتور (B_{bir})	تسلا	۱/۳-۱/۶
حداکثر چگالی شار دندانه استاتور (B_i)	تسلا	۱/۵-۲

ذرات طبق (۲۱) و موقعیت جدید آنها طبق (۲۲) مشخص خواهد شد [۲۷]

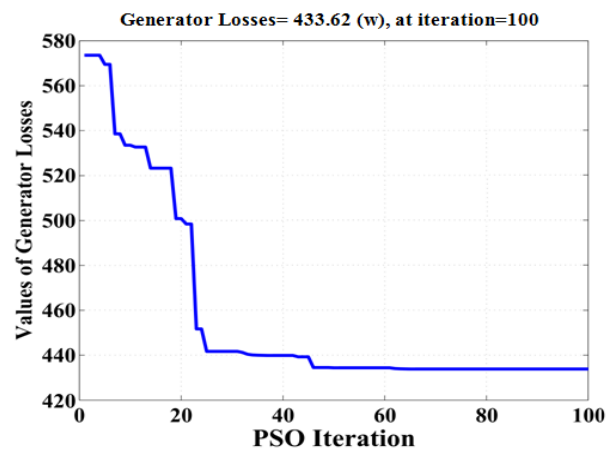
$$V_{j,t+1} = wV_{j,t} + C_1 rand(\cdot, \cdot)(pbest_j - X_{j,t}) + C_2 rand(\cdot, \cdot)(gbest_j - X_{j,t}) \quad (21)$$

$$X_{j,t+1} = X_{j,t} + V_{j,t+1} \quad (22)$$

در روابط فوق $V_{j,t+1}$ و $X_{j,t+1}$ به ترتیب سرعت و موقعیت جدید ذره j در هر تکرار است. $pbest_j$ بهترین موقعیتی است که ذره j تا کنون داشته و $gbest_j$ بهترین موقعیت هر ذره می‌باشد. C_1 و C_2 ضرایب یادگیری نامیده می‌شوند. انتخاب مقدار مناسب برای این پارامترها منجر به تسریع همگرایی الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در بهینه‌های محلی می‌شود. w نیز اینرسی وزنی نام دارد که به منظور کنترل تأثیر سوابق سرعت‌های پیشین بر سرعت‌های جاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. گام‌های الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به طور خلاصه در شکل ۵ قابل مشاهده هستند و باید توجه شود که جمع C_1 و C_2 همیشه برابر با ۴ باشد.



شکل ۸: روند بهینه‌سازی هزینه ساخت ژنراتور.



شکل ۷: روند بهینه‌سازی تلفات ژنراتور.

جدول ۳: نتایج حاصل از سه طراحی بهینه انجام شده.

پارامتر	واحد	طراحی بر اساس حداقل تلفات	طراحی بر اساس حداقل هزینه ساخت	طراحی بر اساس حداقل تلفات و هزینه ساخت
راندمان (η)	-	۹۷٫۱۹	۹۳٫۱۴	۹۶٫۵۹
تلفات ژنراتور (P_{loss})	وات	۴۳۳٫۶۱	۱۱۰۴٫۹۵	۵۲۹٫۲۲
هزینه ساخت (C_t)	دلار آمریکا	۴۰۵۹٫۱۷	۱۶۳۶٫۸	۱۹۵۳٫۳۸
حداکثر بارگذاری الکتریکی (A_m)	آمپر بر متر	۱۳۶۴۹٫۲۷	۵۱۱۳۲٫۰۷	۳۶۴۱۴٫۳۲
حداکثر چگالی شار فاصله هوایی (B_{mg})	تسلا	۰٫۹۸۳	۰٫۹۸۴	۰٫۹۸۴
نسبت قوس قطب به گام قطب (α_i)	-	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۸۹
نسبت طول به قطر داخلی استاتور (K_L)	-	۰٫۱۴۳	۰٫۱۶	۰٫۱۴
نسبت ولتاژ القایی به ولتاژ ترمینال (ε)	-	۱٫۰۵۷	۱٫۳۴۳	۱٫۰۵
تعداد جفت قطب ($2P$)	-	۹	۷	۸
چگالی جریان (j)	آمپر بر میلی‌متر مربع	۳	۶	۳
حداکثر چگالی شار یوغ استاتور (B_{hs})	تسلا	۱٫۱	۱٫۴۵	۱٫۴۹
حداکثر چگالی شار یوغ رتور (B_{hr})	تسلا	۱٫۴۵	۱٫۵۶	۱٫۵۹
حداکثر چگالی شار دندان استاتور (B_t)	تسلا	۱٫۷۸	۱٫۷۷	۱٫۷

مقادیر خود بسیار نزدیک شده‌اند. بنابراین طبق این طراحی بهینه، نیاز به داشتن ژنراتوری با حداقل تلفات و هزینه ساخت برآورده شده است. در جدول ۴ مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از طراحی بهینه و یک نمونه ژنراتور آهن‌ربای دایم سه‌فاز رتور خارجی واقعی معرفی شده در [۱۰] انجام گردیده است. مشخصات اصلی ژنراتورها اعم از توان، سرعت و ولتاژ نامی مشابه هم می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند طراحی بهینه ارائه شده در این مقاله منجر به طراحی ژنراتوری با راندمان بیشتر و حجم کلی کمتر نسبت به نمونه واقعی شده است. با توجه به این که ژنراتور واقعی از نوع سه‌فاز بوده، بنابراین قابلیت اطمینان بالا از ویژگی‌های مهم ژنراتور بهینه‌شده در این مقاله می‌باشد.

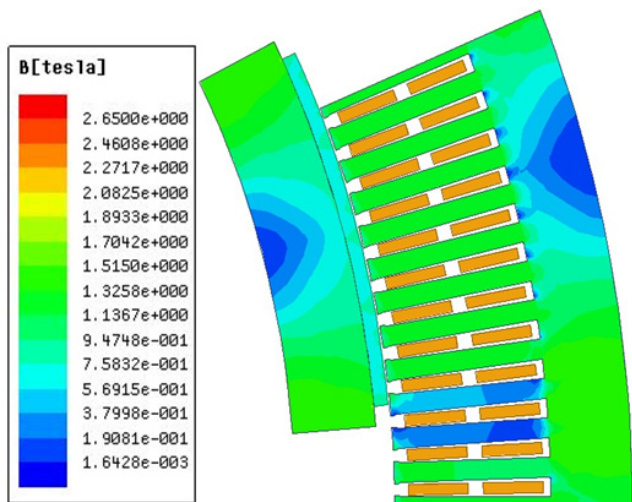
۸- نتایج تحلیل اجزای محدود

به منظور بررسی صحت و اعتبار نتایج طراحی بهینه از نرم‌افزار ماکسول^۱ استفاده شده است ابعاد و پارامترهای ژنراتور بهینه شده در جدول ۵ ارائه شده‌اند. در شکل ۱۱ توزیع چگالی شار در قسمت‌های مختلف ژنراتور مشاهده می‌شود. همچنین شکل ۱۲ مش‌بندی ژنراتور را نشان می‌دهد. ولتاژ القایی خط دو گروه ABC و XYZ در شکل ۱۳ قابل

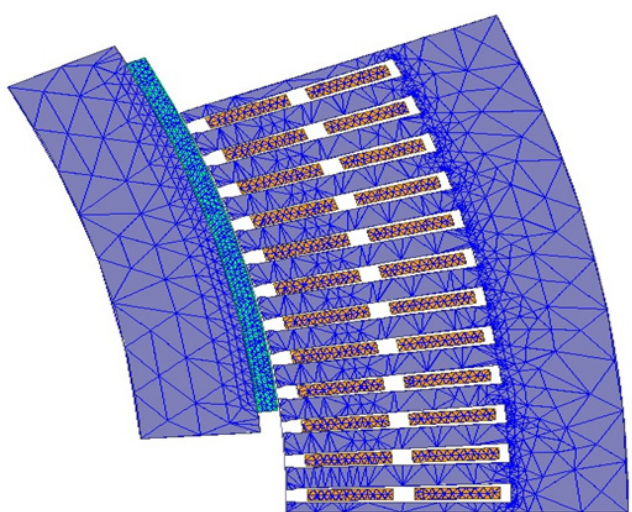
$$F_{cost} = C_t \quad (25)$$

روند بهینه‌سازی هزینه ساخت ژنراتور در شکل ۸ قابل مشاهده است. حداقل هزینه ساخت ژنراتور ۱۶۳۶٫۸ دلار آمریکا می‌باشد. حال با در اختیار داشتن حداقل تلفات و هزینه ساخت ژنراتور می‌توان تابع هدف F_{obj} را بهینه‌سازی نمود. در شکل ۹ روند بهینه‌سازی تابع هدف دومی F_{obj} قابل مشاهده است. طبق این تابع هدف تلفات ۵۲۹٫۲۲ وات و هزینه ساخت ۱۹۵۳٫۳۸ دلار محاسبه شده است. نتایج حاصل از طراحی‌های بهینه انجام شده در جدول ۳ ارائه گردیده است. مقایسه بین تلفات و هزینه ساخت سه طراحی بهینه نیز در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طبق تابع هدف F_{loss} تلفات به کمترین مقدار خود یعنی ۴۳۳٫۶۲ وات رسیده ولی هزینه ساخت در مقایسه با حداقل هزینه ساخت (۱۶۳۶٫۸ دلار) تقریباً ۱۴۸٪ افزایش یافته است. همچنین طبق تابع هدف F_{cost} هزینه ساخت به حداقل مقدار خود یعنی ۱۶۳۶٫۸ دلار رسیده ولی تلفات در مقایسه با حداقل مقدار خود (۴۳۳٫۶۲ وات) ۱۵۴٪ درصد افزایش داشته است. بنابراین هیچ کدام از این دو تابع هدف نتوانستند نیاز مسأله یعنی حداقل تلفات و هزینه ساخت را برآورده سازند. حال با مراجعه به شکل ۱۰ و نتایج حاصل از بهینه‌سازی تابع هدف F_{obj} مشاهده می‌شود که تلفات و هزینه ساخت به حداقل

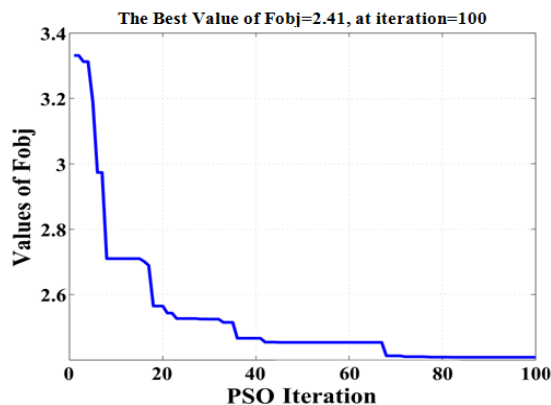
1. Ansoft-MAXWELL Software



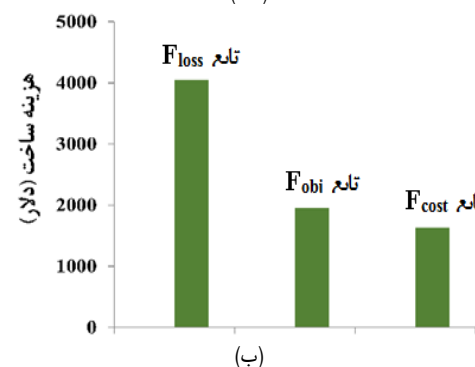
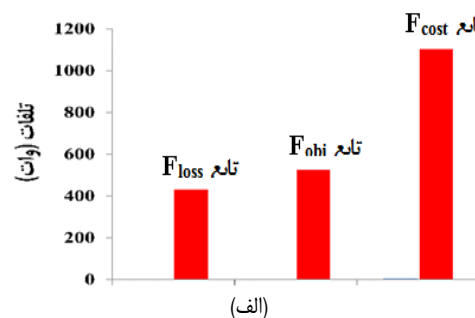
شکل ۱۱: نمایش توزیع چگالی شار در قسمت‌های مختلف ژنراتور.



شکل ۱۲: نمایش مش بندی قسمت‌های مختلف ژنراتور.



شکل ۹: روند بهینه‌سازی تابع هدف F_{obj} .



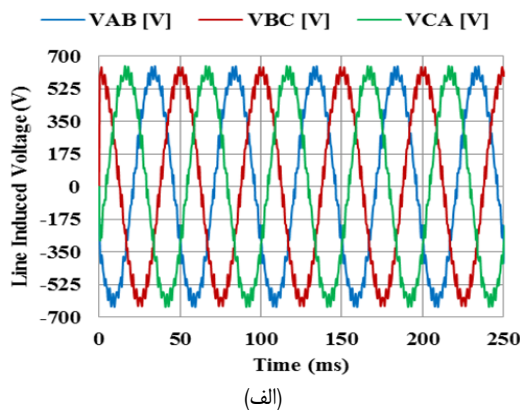
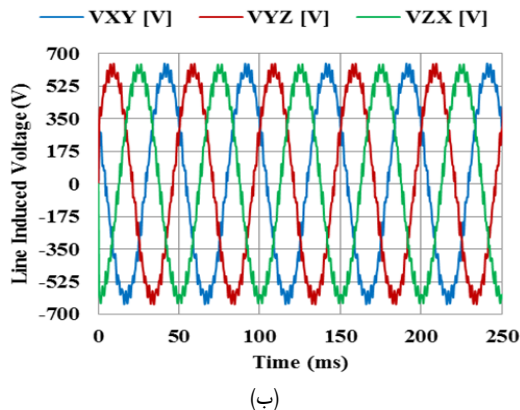
شکل ۱۰: مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی سه تابع هدف، (الف) مقایسه تلفات و (ب) مقایسه هزینه ساخت.

جدول ۴: مقایسه نتایج حاصل از طراحی بهینه و نمونه ژنراتور واقعی.

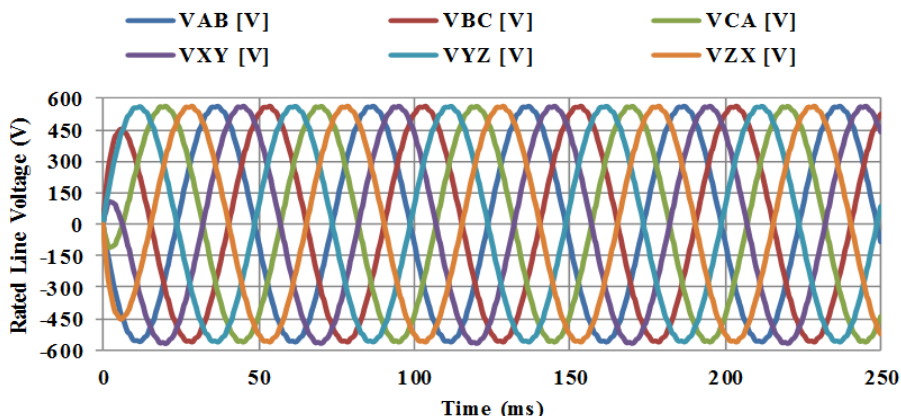
پارامتر	واحد	ژنراتور شش‌فاز بهینه‌شده	ژنراتور سه‌فاز واقعی ارائه‌شده در [۱۰]
راندمان	-	۹۶٫۵۹	۹۴٫۴
حجم کلی	سانتی‌متر مکعب	۱۷۹۸۹	۳۳۵۴۱
نسبت قوس قطب به گام قطب	-	۰٫۸۹	۰٫۷۳
سرعت نامی محور ژنراتور	دور بر دقیقه	۱۵۰	۱۵۰
ولتاژ نامی	ولت	۴۰۰	۴۰۰
قطر خارجی ژنراتور	میلی‌متر	۷۴۱٫۱۳	۶۵۳٫۵
قطر خارجی استاتور	میلی‌متر	۵۹۵٫۷۶	۶۲۳
طول ژنراتور	میلی‌متر	۸۳٫۴	۱۰۰
ضخامت ماده آهنربای دائم	میلی‌متر	۴٫۵۸	۶

دقت بالایی طراحی بهینه انجام‌شده قابل مشاهده می‌باشد. گشتاور دندانه‌ای بر حسب زاویه الکتریکی در شکل ۱۵ قابل مشاهده می‌باشد. مقدار گشتاور دندانه‌ای $۴/۴۲$ نیوتن‌متر اندازه‌گیری شده است. در زمان شبیه‌سازی مشاهده شده که با مورب‌نمودن شیار استاتور به اندازه یک گام شیار می‌توان این گشتاور مزاحم را کاملاً حذف نمود.

مشاهده می‌باشد. مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ القایی خط $۳۳۴/۷$ ولت اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱۴ ولتاژ ترمینال خط ژنراتور تحت بار نامی برای دو گروه ABC و XYZ نمایش داده شده است. مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ خط تحت بار نامی $۳۹۹/۰۲$ ولت اندازه‌گیری شده که اعوجاج هارمونیک کل آن $۰/۷۹\%$ می‌باشد. مقایسه بین نتایج طراحی بهینه و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در جدول ۶ ارائه شده که



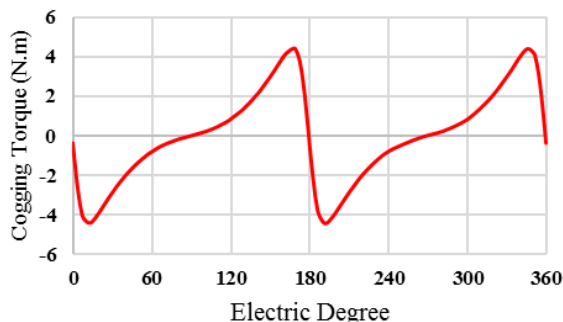
شکل ۱۳: شکل موج ولتاژ القایی خط، (الف) گروه ABC و (ب) گروه XYZ.



شکل ۱۴: شکل موج ولتاژ ترمینال خط ژنراتور در بار نامی.

جدول ۵: پارامترهای ژنراتور بهینه‌شده.

مقدار	واحد	پارامتر
۷۴۱/۱۳	میلی‌متر	قطر خارجی استاتور (D_e)
۵۹۵/۷۶	میلی‌متر	قطر داخلی استاتور (D)
۸۳/۴	میلی‌متر	طول استاتور (L)
۲۵/۱۸	میلی‌متر	ضخامت یوغ استاتور (h_{bis})
۲۳/۶۱	میلی‌متر	ضخامت یوغ رتور (h_{bir})
۵/۸	میلی‌متر	عرض دندانه استاتور (w_t)
۴۷/۵	میلی‌متر	ارتفاع دندانه استاتور (h_t)
۴/۵۸	میلی‌متر	ضخامت آهنربا (h_{pm})
۳۸۴	-	تعداد دور هر فاز (N_{ph})
۲۰	هرتز	فرکانس (f)
۴۳۵/۰۲	ولت	مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ القایی خط (E_{ph})



شکل ۱۵: شکل موج گشتاور دندانه‌ای بر اساس تحلیل اجزای محدود.

۹- نتیجه گیری

ژنراتور بهینه‌شده و یک نمونه ژنراتور آهنربای دایم رتور خارجی واقعی انجام گردیده که دستیابی به راندمان بیشتر و حجم کلی کمتر از ویژگی‌های مهم روش طراحی پیشنهادی بوده است. از طرف دیگر دستیابی به راندمان ۹۶/۵۹٪ برای یک ژنراتور با سرعت و توان نامی پایین از دیگر ویژگی‌های خوب روش طراحی ارائه‌شده در این مقاله می‌باشد. در پایان صحت طراحی انجام‌شده با استفاده از تحلیل اجزای محدود مورد تأیید قرار گرفته است.

مراجع

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC). *Global Wind Report: Annual Market Update, 2018* [Online]. Available: <http://files.gwec.net/register?file=/files/GWR2017.pdf>

در این مقاله طراحی بهینه یک ژنراتور سنکرون آهنربای دایم توان پایین به منظور کاربرد در توربین‌های بادی بدون جعبه‌دنده ارائه گردیده که جهت افزایش قابلیت اطمینان، ژنراتور از نوع شش‌فاز انتخاب شده است. با توجه به نوع کاربرد ژنراتور، هدف از بهینه‌سازی طراحی کاهش تلفات و هزینه ساخت در نظر گرفته شده است. بنابراین روابط طراحی ژنراتور سنکرون آهنربای دایم شار شعاعی مورد بررسی قرار گرفته و متغیرهای طراحی استخراج شده‌اند. سپس به منظور دستیابی به یک طراحی مناسب، با اعمال الگوریتم ازدحام ذرات ابتدا تلفات و هزینه ساخت به طور جداگانه بهینه شده و سپس با تعریف یک تابع هدف دومنظوره مناسب به صورت هم‌زمان بهینه شده‌اند. مقایسه بین نتایج سه طراحی بهینه انجام‌شده نشان می‌دهد که تابع هدف دومنظوره منجر به طراحی مناسب برای ژنراتور با حداقل تلفات و هزینه ساخت شده است. به منظور بررسی قابلیت‌های روش طراحی پیشنهادی، مقایسه‌ای بین پارامترهای

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

پارامتر	واحد	نتایج طراحی بهینه	نتایج تحلیل اجزای محدود
حداکثر چگالی شار فاصله هوایی	تسلا	۰.۹۸۴	۰.۹۸۳
مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ القایی خط	ولت	۴۳۵.۰۲	۴۳۴.۷
مقدار مؤثر مؤلفه اصلی ولتاژ خط در بار نامی	ولت	۴۰۰	۳۹۹.۰۲
توان نامی	وات	۱۵۰۰۰	۱۴۹۵۶.۶۸
گشتاور دندانه‌ای	نیوتن‌متر	۳.۷۸	۴.۴۲
حداکثر چگالی شار یوغ استاتور	تسلا	۱.۴۹	۱.۴۷
حداکثر چگالی شار یوغ رتور	تسلا	۱.۵۹	۱.۵۳
حداکثر چگالی شار دندانه استاتور	تسلا	۱.۷	۱.۶۹

- [20] I. Boldea, *Variable Speed Generators*, 1st Ed., New York: CRC Press, 2005.
- [21] A. Khan and P. Pillay, "Design of a PM wind, optimized for energy capture over a wide operating range," in *Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Mach. Drives*, pp. 1501-1506, San Antonio, TX, USA, May, 2005.
- [22] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, 1 Ed., U.K: Wiley, 2009.
- [23] S. Eriksson and B. Bernhoff, "Loss evaluation and design optimization for direct driven permanent magnet synchronous generators for wind power," *J. Applied Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 265-271, Jan. 2011.
- [24] H. Jagau, A. Khan, and P. Barendse, "Design of a sustainable wind generator system using redundant material," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 23, no. 6, pp. 1827-1837, Nov. 2012.
- [25] Renewable Energy Organization of Iran, *Iranian Renewable Energy Organization Magazine*, 2010, [Online] Available: http://www.satba.gov.ir/suna_content/media/image/2015/11/4222_orig.pdf
- [26] S. Alshibani, V. Agelidis, and R. Dutta, "Application of particle swarm optimization in the design of large permanent magnet synchronous generators for wind turbines," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power and Energy*, pp. 162-167, Kota Kinabalu, Malaysia, Dec. 2012.
- [27] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, pp. 1942-1948, Perth, WA, Australia, Dec. 1995.
- [28] M. Comanescu, A. Keyhani, and M. Dai, "Design and analysis of 42 V permanent-magnet generator for automotive applications," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 1, pp. 107-112, Mar. 2003.
- [2] A. Tummala, R. Velamati, D. Sinha, V. Indrajaya, and V. Krishna, "A review on small scale wind turbines," *J. Renew. Sustai. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1351-1371, Apr. 2016.
- [3] H. Li, Z. Chen, and H. Polinder, "Optimization of multibrid permanent-magnet wind generator systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 82-92, Mar. 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] Y. Chen, P. Pillay, and A. Khan, "PM wind generator topologies," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp. 1619-1626, Nov./Dec. 2005.
- [6] A. Grauers, "Efficiency of three wind energy generator systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 3, pp. 650-657, Sep. 1996.
- [7] 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 Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3802-3809, Sep. 2000.
- [8] H. Polinder, F. Pijl, G. Vilder, and P. Tavner, "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 3, pp. 725-733, Sep. 2006.
- [9] H. Li and Z. Chen, "Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind power generator systems," *J. Renew. Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1175-1184, Apr. 2009.
- [10] 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 Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2147-2156, May 2012.
- [11] J. Tapia, J. Pyrhonen, J. Puranen, P. Lindh, and S. Nyman, "Optimal design of large permanent magnet synchronous generators," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 1, pp. 642-650, Jan. 2013.
- [12] 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 Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, pp. 605-609, Jun. 2016.
- [13] A. McDonald and N. Bhuiyan, "On the optimization of generators for offshore direct drive wind turbines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 1, pp. 348-358, Mar. 2017.
- [14] T. P. M. Bazzo, J. F. Kolzer, R. Carlson, F. Wurtz, and L. Gerbaud, "Multiphysics design optimization of a permanent magnet synchronous generator," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 12, pp. 9815-9823, Dec. 2017.
- [15] K. Wang, Z. Q. Zhu, and G. Ombach, "Torque improvement of five-phase surface-mounted permanent magnet machine using third-order harmonic," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 3, pp. 735-747, Sep. 2014.
- [16] E. Levi, M. Jones, S. Vukosavic, and H. Toliyat, "Operating principles of a novel multiphase multimotor vector-controlled drive," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 3, pp. 508-517, Sept. 2004.
- [17] G. Singh, A. Kumar, and R. Saini, "Performance evaluation of series compensated self-excited six-phase induction generator for stand-alone renewable energy generation," *J. Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 288-297, Jan. 2010.
- [18] N. Bianchi, S. Bolognani, and P. Frare, "Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 2, pp. 396-404, Jun. 2006.
- [19] J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, 3rd Ed. New York: CRC Press, 2009.

محمدابراهیم مؤذن تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی شامل طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی می‌باشد.

سیداصغر غلامیان در سال ۱۳۷۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران و در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت را از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل دریافت نمود. ایشان پس از آن به دوره دکترای مهندسی برق قدرت در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران وارد شده و در سال ۱۳۸۷ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق قدرت از دانشگاه مذکور گردید. دکتر غلامیان از سال ۱۳۸۷ تا کنون در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به عنوان هیأت علمی گروه برق قدرت مشغول فعالیت است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی، روش‌های اجزای محدود در ماشین‌های الکتریکی و مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌باشد.

میثم جعفری نوکنندی مقطع کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق قدرت در دانشگاه صنعتی شریف گذراند و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری در مهندسی برق قدرت را در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۹ از دانشگاه تهران دریافت نمود و از سال ۱۳۹۰ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مشغول به کار گردیده است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت می‌باشد.