



Optimizing the high temperature superconducting energy storage dimensions with the aim of reducing losses and cost factor

M. Khoduz¹, M. Niaz Azari²

* Assistant Professor, University of Science and Technology of Mazanadaran,

(Received: 2024/07/08 revised: 2024/09/09 Accepted:2024/10/22 published: 2024/11/06)

Abstract

Energy storage is one of the important issue in today's society, and among the existing solutions, superconducting magnetic energy storage is a suitable solution despite the technical complexity of their dimensions. The main goal of this article is to provide a positive approach in providing optimal dimensions of superconducting magnetic energy storage, taking into account the cost factor and reducing power losses. To optimize SMES dimensions, the gray wolf optimization algorithm has been used due to the special efficiency of this algorithm in finding the optimal value and its convergence speed. Optimizing the dimensions of SMES in order to reduce power losses by considering the economic parameters and the cost factor is included in this paper. The obtained results show the simultaneous effect of cost and power losses on the optimum dimensions of the SMES. The simulation results demonstrate that considering the cost factor cause a 9% and 54% reduction in the power loss and the optimum volume of the 100 kJ SMES, respectively.

Keywords: Superconducting energy storage, cost factor, power loss, gray wolf algorithm

Cite this article: M. Khodsuz, M. NiazAzari, "Optimizing the high temperature superconducting energy storage dimensions", Applied Electromagnetics , vol.12 , no.2 , pp.63-72. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.7.7>



© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: miladniazazari@mazust.ac.ir

علمی - پژوهشی

بهینه‌سازی ابعاد ذخیره‌ساز انرژی ابررسانای دما بالا با هدف کاهش تلفات و فاکتور هزینه

معصومه خودسوز^۱، میلاد نیاز آذری^{۲*}

۱- دانشیار دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران؛ ۲- استادیار دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶)

چکیده

امروزه برهم‌کنش باریکه‌های لیزری با مواد در گستره وسیعی از کاربردهای روزانه، صنعتی، علمی و پزشکی مورد توجه قرار دارد. در این مقاله برهم‌کنش تک پالس هارمونیک دوم لیزر پالسی نانوآنیته Nd-YAG با فلز طلا مورد بررسی قرار می‌گیرد تا شناخت بهتری از مبانی برهم‌کنش باریکه لیزری با فلزات حاصل شود و شرایط مناسب برای تابش لیزر مورد ارزیابی قرار گیرد. شبیه‌سازی‌ها با حل معادله درجه دوم گرما در سه بعد با روش تعمیم‌یافته تفاضل محدود حوزه زمان (G-FDTD) و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن انجام شده است. خصوصیات فلز مانند ضریب هدایت گرمایی طلا و ظرفیت گرمایی ویژه آن در مدل‌سازی به‌صورت تابع دما در نظر گرفته شده است تا نتایج به واقعیت نزدیک‌تر شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که انرژی هر پالس لیزر، پهنای زمانی پالس لیزر و شعاع باریکه لیزری بر توزیع دما در سطح و عمق فلز طلا و نیز بر ناحیه تحت‌تأثیر گرما موثر هستند و بیشینه دما با افزایش انرژی هر پالس رابطه مستقیم دارد؛ ولی با پهنای زمانی پالس و نیز اندازه لکه لیزری رابطه معکوس دارد. همچنین، بیشینه دما نسبت به قله پالس لیزری تأخیر زمانی دارد و این تأخیر با پهنای زمانی پالس رابطه مستقیم و خطی نشان می‌دهد. علاوه بر این، در این مقاله، وابستگی آستانه ذوب طلا به مشخصه‌های تابش لیزر مثل اندازه لکه لیزری، پهنای خط و شار انرژی لیزر مورد بررسی قرار می‌گیرد تا نقشه کلی برای کاربران برای دستیابی به شرایط ذوب با تابش تک پالس هارمونیک دوم لیزر پالسی نانوآنیته Nd-YAG فراهم شود.

کلیدواژه‌ها: لیزر پالسی نانوآنیته، پهنای پالس لیزر، برهم‌کنش لیزر با طلا، روش تعمیم‌یافته تفاضل محدود حوزه زمان.

۱- مقدمه

آن‌ها می‌تواند در گرو سیستم‌های ذخیره انرژی باشد. در شرایط کنونی، با توجه به افزایش سطح تولید توان از منابع تجدید پذیر، اهمیت سیستم‌های ذخیره‌سازی این انرژی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. سیستم ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا^۱ توانایی کاهش نوسانات و افت ولتاژ کوتاه‌مدت را داشته و این تجهیز به‌طور موثر مدت‌زمان خرابی را کاهش خواهد داد. ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابررسانا یکی از فناوری‌های امیدوارکننده است که اغلب در سناریوهای توان با ویژگی‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴، ۱]. SMES نقش کلیدی در صنعت برق داشته و ویژگی‌هایی را ارائه می‌دهد که سایر

کیفیت برق یکی از مهم‌ترین مسائل سیستم قدرت به شمار می‌آید. مصرف‌کنندگان بارهای حساس از جمله رایانه‌های دیجیتال و کنترلرهای الکترونیکی، میکروکنترلرها و غیره نیاز شدیدی به انرژی باکیفیت داشته و هرگونه کاهش ولتاژ یا وقفه‌های کوتاه‌مدت بر عملکرد صحیح این تجهیزات تأثیرگذار است. از طرف دیگر، انرژی در جهان در نقطه حساسی قرار دارد، سوخت‌های فسیلی، منبع اصلی انرژی در بسیاری از کشورها، رو به اتمام است. از این رو منابع انرژی تجدید پذیر نقش مهمی را در تضمین برقراری انرژی الکتریکی برعهده گرفته‌اند که موفقیت

¹ Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

استاد: خودسوز، معصومه، نیاز آذری، میلاد، "بهینه‌سازی ابعاد ذخیره‌ساز انرژی ابررسانای دما بالا با هدف کاهش تلفات و فاکتور هزینه"،

الکترومغناطیس کاربردی، ۱۲ (۲)، ۷۲-۶۳، ۱۴۰۳، <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.7.7>

فناوری‌ها قادر به ارائه آن‌ها نیستند. این فناوری برای تنظیم نوسانات برق و حفظ پایداری شبکه در هنگام تغییرات بزرگ دربار استفاده می‌شود.

بر این اساس، علاوه بر تأثیر بر زمان‌بندی مدیریت انرژی، SMES کیفیت توان را بهبود بخشیده و با تنظیم ولتاژ می‌تواند تقاضای بار پیک را کاهش دهد. سیستم SMES یک سیستم ذخیره انرژی است که با عبور جریان از یک سیم‌پیچ ابررسانا که روی هسته هوا پیچیده شده است انرژی را ذخیره می‌کند. با توجه به خاصیت ابرسانایی، لازم است این سیم‌پیچ در دمای برودتی کار کند. امروزه SMES‌های تجاری در دمای حدود ۴ درجه کلوین (۲۶۹- درجه سانتی‌گراد یا ۴۵۲- درجه فارنهایت) (ابرسانایی با دمای پایین) کار می‌کنند. حفظ دما در مقدار برودتی توسط یک یخچال مخصوص برودتی که از ماده خنک‌کننده استفاده می‌کند، انجام می‌شود [۵، ۶].

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابررسانا دارای مزایای زیر در مقایسه با سایر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هستند [۷]:

- راندمان بالای سیستم SMES با به حداقل رسیدن تلفات
- زمان پاسخ سریع سیستم SMES
- قابلیت تخلیه مناسب و شارژ مجدد برای تعداد نامحدودی

بهینه‌سازی سیم‌پیچ نوع سلونوئید SMES در چند دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است [۱-۴]. مقالات منتشرشده بیشتر به رابطه بین مؤلفه‌های هندسی سیم‌پیچ و میدان مغناطیسی برای کاهش حجم رسانا پرداخته‌اند. در مرجع [۸] یک تکنیک چند هدف را با استفاده از منطق فازی همراه با روش اجزای محدود برای بهینه‌سازی حجم سیستم ذخیره انرژی میکرو ابررسانا برای نوع حلقوی و پیکربندی متقارن محوری استفاده شده است. در این تحقیق، نویسندگان بهینه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی میکرو را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها از روش‌های طراحی بهینه و بهینه‌سازی مدل‌های ریاضی برای بهبود کارایی و عملکرد سیستم استفاده کرده‌اند. مهم‌ترین هدف این تحقیق بهینه‌سازی ابعاد، جریان و ولتاژ سیستم است تا بتوان انرژی را به صورت بهینه ذخیره کرد. در [۹] از الگوریتم ژنتیک همراه با امان محدود برای بهینه‌سازی هندسه سیم‌پیچ ابررسانای دمای بالا^۱ برای SMES استفاده شده است تا تلفات جریان متناوب را به حداقل برسد. در این مقاله، نویسندگان به بررسی طراحی یک کوئل Bi-2223/Ag بر اساس الگوریتم ژنتیک و روش امان محدود پرداخته‌اند. آن‌ها ابتدا ویژگی‌های الکترومغناطیسی مورد نیاز برای کوئل را مشخص کرده و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی طراحی کوئل را انجام

داده‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از الگوریتم ژنتیک منجر به بهبود عملکرد کوئل و افزایش کارایی آن می‌شود. در [۱۰] حداقل رساندن حجم هادی سیم‌پیچ SMES مبتنی بر HTS متمرکز شده است. یک سیم‌پیچ ۵/۰ مگاژول BSCCO که در دمای ۲۰ درجه کلوین کار می‌کند در سال ۲۰۰۳ در ژاپن طراحی گردید [۱۱]. بهینه‌سازی با روش باز پخت برای به حداقل رساندن حجم HTS انجام گردید. در [۱۲]، بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک خودکار با تحلیل مغناطیسی استاتیکی در روش اجزای محدود برای تعیین ضریب ایمنی و تنش عملکرد آهنربا انجام گردید. بهینه‌سازی طراحی یک آهنربای SMES با ظرفیت ۶۰۰ kJ بر اساس تجزیه و تحلیل تنش و میدان مغناطیسی است. این مقاله بر روی بررسی تنش‌های ایجاد شده در آهنربا و نیز تجزیه و تحلیل میدان مغناطیسی آن تمرکز دارد. از دیدگاه فنی، مقاله بهینه‌سازی طراحی مغناطیس SMES به صورتی است که علاوه بر محاسبه تنش‌های مکانیکی، تأکید بر تأثیرات میدان مغناطیسی نیز دارد تا به وسیله آن بتوان بهبودهای موثر بر روی عملکرد یا کارایی آن اعمال کرد. در [۱۳]، نویسندگان بهینه‌سازی هندسی برای سلونوئیدهای SMES را با استفاده از روبان HTS (Superconducting Tape) به هدف بهبود عملکرد سلونوئید از دیدگاه‌های هندسی و استفاده از روبان HTS پرداختند. در این مقاله، از مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی برای بهینه‌سازی هندسی سلونوئید SMES با استفاده از روبان HTS استفاده شده است. در [۱۴]، طراحی یک سلونوئید μ -SMES با ظرفیت ۲۰۰ کیلوژول بر اساس فناوری بررسی شده است. مقاله شامل مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی، طراحی سلونوئید μ -SMES با استفاده از فناوری HTS است. نوعی از مواد ابررسانا هستند که در دماهای بالا قادر به انتقال جریان بدون هیچ گونه مقاومتی هستند. این مواد، مزایایی از جمله کارایی بالا، ابعاد کوچک‌تر، قدرت ذخیره بیشتر و سرعت تخلیه بالا را در مقایسه با مواد فوق رسانای معمولی دارند.

در [۱۵]، طراحی یک سیم‌لوله برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی با مقیاس کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله طرحی برای جذب و ذخیره یک میدان مغناطیسی با حداکثر انرژی ممکن در سیستم‌های SMES با ابعاد کوچک ارائه شده است. طرح پیشنهادی شامل آرایش دولایه از سیم‌های ابررسانایی با قطر کوچک‌تر است که به شکل دوپنیک در ساختار مونتاژ شده‌اند. استفاده از این ساختار سیم دو برابر، می‌تواند باعث افزایش حداکثر توان ذخیره‌شده در سیستم‌های SMES شود. در مقاله، نتایج شبیه‌سازی عددی برای طرح پیشنهادی شده و مقایسه آن با طرح‌های دیگری ارائه شده است. نتایج نشان داده است که طرح پیشنهادی سطح ذخیره‌سازی بالاتری را نسبت به طرح‌های دیگری ارائه می‌دهد.

² Finite Element Method (FEM)

¹ High Temperature Superconductor (HTS)

تجربی مورد آزمایش قرار گرفت.

در مرجع [۲۱]، رویکردی برای به حداقل رساندن تنش با بهینه‌سازی مقطع یک آهنربای حلقوی ارائه شده است. توزیع میدان مغناطیسی آهنربا با استفاده از روش اجزای محدود ارزیابی و بررسی شده است و یک منحنی همگرایی از حداکثر اثر میدان مغناطیسی بر روی سیم‌پیچ ارائه شده است. همچنین یک طرح بهینه از آهنربای SMES ۴۰۰ مگاژول بر اساس این منحنی همگرایی بازتولید شده و توزیع تنش الکترومغناطیسی در سیم‌پیچ آهنربا، بررسی شده است.

در مرجع [۲۲] استفاده از ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی ابررسانا را به عنوان یک دستگاه ذخیره انرژی پشتیبانی برای یک سیستم کشتی مورد مطالعه قرار گرفته است. رهنمودهایی برای ابعاد، توان و انرژی، SMES بیان شده است. علاوه بر این، یک روش بهینه‌سازی به منظور مقایسه مواد ابررسانای مختلف و دماهای عملیاتی بیان داده شده است. در مرجع [۲۳]، یک دستگاه ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی ۱۰ کیلوژول با استفاده از MgB₂، در جهان با خنک‌کننده هیدروژن مایع طراحی شد و نمونه‌های اولیه آن به عنوان یک سیم‌پیچ SMES آزمایش گردید. باوجود تحقیقات انجام شده در این زمینه هنوز نیاز به بهینه‌سازی جهت انتخاب ابعاد بهینه هر واحد ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا با توجه به ظرفیت آن وجود دارد. در این مقاله از روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۱ استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌ساز گرگ خاکستری، یکی از انواع الگوریتم‌های فرا ابتکاری جدید است که در سال ۲۰۱۴ باهدف بهینه‌سازی و با رویکرد نوین مدل‌سازی فرآیند سلسله‌مراتب رهبری و سازوکار شکار گرگ‌های خاکستری در طبیعت، ابداع گردیده است. از مدت‌زمان کوتاه پس از ارائه، از این الگوریتم در حل مسائل بسیاری در حوزه بهینه‌سازی استفاده گردید. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه، مشخص شد که دامنه مطالعات در خصوص به کارگیری الگوریتم‌های فرا ابتکاری نوین در بهینه‌سازی مسائل مهندسی از کار آیی مناسبی برخوردار است. بهینه‌سازی ابعاد ذخیره‌ساز انرژی در جهت کاهش تلفات و افزایش ظرفیت آن با لحاظ نمودن مؤلفه‌های اقتصادی در این مقاله صورت گرفته است. همچنین تأثیر هم‌زمان تلفات و هزینه در بهینه‌سازی ابعاد ذخیره‌ساز دما بالا در این مقاله مطرح شده است که نتایج حاصله بر تأثیر هم‌زمان هزینه و تلفات بر مؤلفه‌های ذخیره‌ساز ابررسانا است. به طور کلی هدف این مقاله تجزیه و تحلیل SMES به عنوان یک دستگاه ذخیره انرژی از لحاظ مواد ابررسانا و سیستم برودتی،

در [۱۶]، نویسندگان روشی جدید برای کاهش تنش و افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی در سیستم HTS-SMES با استفاده از ساختار تقویت‌کننده Overbanding را معرفی نموده‌اند. سیستم HTS-SMES یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی است که از ابررسانایی HTS در دماهای بالا و در حضور میدان مغناطیسی استفاده می‌کند. در این مقاله، برای کاهش تنش‌های مکانیکی در سیم‌های HTS و افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی، ساختار تقویت‌کننده Overbanding مورد استفاده قرار گرفته است. Overbanding یک روش است که در آن نوارهای ابررسانا جامد به صورت تقویت‌کننده در اطراف سیم‌های HTS قرار می‌گیرند. این نوارها به عنوان یک لایه محافظ عمل کرده و تنش‌های مکانیکی در سطح HTS را کاهش می‌دهند. همچنین، این ساختار تقویت‌کننده می‌تواند بهبود فراوانی در ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در سیستم SMES ایجاد کند.

از آنجایی که جریان بحرانی هادی تحت تأثیر میدان مغناطیسی و جهت اعمالی آن است، بهینه‌سازی پیکربندی سیم‌پیچ برای به حداقل رساندن آن حیاتی است. در [۱۷] یک طراحی و ارزیابی بهینه برای پیکربندی مناسب آهنربای SMES با الگوریتم ژنتیک و روش اجزای محدود انجام شده است. در [۱۸] طرحی برای سیم‌پیچ برقی NbTi در دمای ۴/۲ درجه کلون ارائه شده است. میدان مغناطیسی در محل بحرانی سیم‌پیچ محاسبه و طرح ارائه شده با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی بهینه گردید.

در [۱۹] یک روش طراحی دقیق برای یک SMES ۵ مگاژول با در نظر گرفتن تأثیر تنش بر جریان انتقال آن ارائه شده است. مشکل اصلی SME تا چگالی انرژی پایین آن‌هاست که این عنصر را به یکی از عناصر کلیدی در شبکه برق و سایر کاربردهای خاص مانند پمپ‌های شارش تبدیل نموده است.

در مرجع [۲۰] معادلات ریاضی یک سیم‌پیچ شیر برقی واقعی ارزیابی شده و معادلات معادل یک سیم‌پیچ حلقوی از قوانین الکترومغناطیسی توسعه داده شده است. سپس یک ساختار عملی تشکیل شده توسط سلونوئیدهای متصل به صورت سری در امتداد یک محور دایره‌ای (ساختار شبه حلقوی) مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به تعداد زیاد معادلات، از روش اجزای محدود استفاده شده است. در نهایت، به منظور اعتبارسنجی نتایج بدون ساختن شیر برقی کامل (در آن زمان غیرممکن)، یکی از جفت‌های مغناطیسی بین دو شیر برقی در سیم‌پیچ شبه حلقوی با روش تئوری توسعه داده شد و به صورت

¹ Gray Wolf Optimization (GWO)

از آنجایی که هیچ تبدیل انرژی مانند انرژی شیمیایی به الکترومغناطیسی در باتری تا وجود ندارد، زمان پاسخ قابل دستیابی بسیار کم است و بنابراین می‌توان به مقادیر توان بالادست یافت. علاوه بر این، این دستگاه‌ها بسیار کارآمد بوده و دارای راندمان ۹۵ درصد می‌باشند [۲۵-۲۶].

شرایط مرزی مناسب SMES و هزینه جریمه ناچیز در واحد توان، C_p ، SMES را به یک ESS ایدئال برای کاربردهای برقی تبدیل نموده است. سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای یک SMES را می‌توان به عنوان مجموع هزینه مواد CSC و هزینه‌های برودتی $C_{cooling}$ تخمین زد [۲۴]:

$$C(\$) = C_{sc} + C_{cooling}$$

$$C_{sc} = 45 * V_{coil} * C_{HTS} \quad (3)$$

$$C_{cooling} = 3.1 * (P_w * \frac{4.2}{20})^{0.63}$$

C_{HTS} بر اساس داده‌های سازنده‌های مختلف استخراج می‌شود و V_{coil} حجم ابررسانا است. برای هزینه خنک‌سازی، $C_{cooling}$ ، از تقریب تجربی پیشنهاد شده در [۲۴] استفاده شده است.

۲-۳- تجزیه و تحلیل سیم‌پیچ ابررسانا

با بسط رابطه (۲) این امکان وجود دارد تا انرژی SMES را به مؤلفه‌های هندسی آن مرتبط نمود. با بسط این رابطه، اندوکتانس، تنها به هندسه سیم‌پیچ بستگی داشته و با تعریف ضرایب $\alpha = (2a_2/2a_1)$ و $\beta = (2a_2/2b)$ بر اساس مؤلفه‌های معرفی شده در شکل (۱) می‌توان نوشت:

$$L = \mu_0 a_1 N^2 \gamma(\alpha, \beta) \quad (4)$$

که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی، a_1 شعاع داخلی سیم‌پیچ، N تعداد دور، $\gamma(\alpha, \beta)$ بدون بعد بوده و مؤلفه‌ای است که فقط تابع شکل سیم‌پیچ است [۲۷]. همچنین جریان سیم‌پیچ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I = \phi \lambda J_e(B_{sc}, T_{op}) A_{coil} / N \quad (5)$$

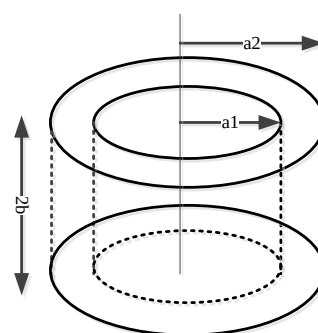
که ϕ نقطه کار آهنربا (نسبت جریان نامی به بحرانی) λ ضریب پرکننده سیم‌پیچ، A_{coil} سطح مقطع، $J_e(B_{sc}, T_{op})$ چگالی جریان، B_{sc} میدان مغناطیسی در سیم‌پیچ است.

ماده ابررسانا بکار گرفته شده (REBCO) بوده و چگالی جریان بحرانی آن و رابطه بین چگالی جریان بحرانی J_c و چگالی جریان مهندسی J_e با استفاده از (۶) محاسبه می‌شود [۱۸].

ایجاد دستورالعمل‌های کلی برای ابعاد آن و ارائه ابزارهای بهینه به منظور بهینه‌سازی آن با در نظر گرفتن فاکتور هزینه است.

۲- آنالیز مدل

سیم‌پیچ ابررسانا از رشته‌های ابررسانایی تشکیل شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. هدف از این مقاله بهینه‌سازی مؤلفه‌های هندسی ذخیره‌ساز انرژی با در نظر گرفتن قیود اقتصادی و حد انرژی قابل ذخیره در این ذخیره کننده است. بر این اساس لازم است تا در ابتدا به بررسی مؤلفه‌های مدل‌سازی آن پرداخته شود.



شکل (۱). شما تیک سلونوئید ابررسانا

۲-۱- سرمایه‌گذاری سیستم ذخیره انرژی

سرمایه‌گذاری برای نصب یک سیستم ذخیره انرژی ۱ در (۱) نشان داده شده است.

$$C_I = C_p P_{SMES} + C_e E_{SMES} \quad (1)$$

که C_I هزینه نصب سیستم ذخیره‌ساز انرژی، C_p هزینه جریمه در واحد توان، P_{SMES} توان اسمی، C_e هزینه هر واحد انرژی و E_{SMES} انرژی ذخیره‌سازی SMES است [۲۲] و [۲۴].

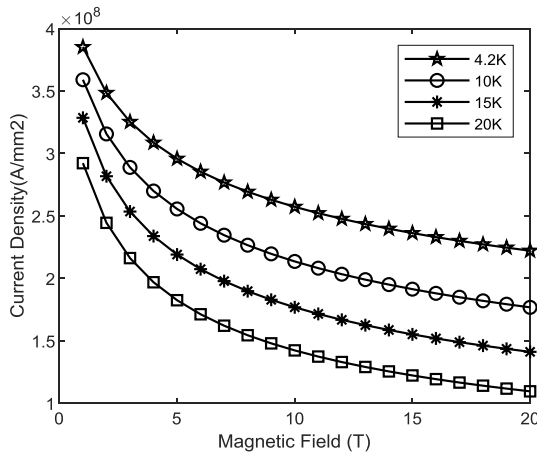
۲-۲- ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا

یک SMES انرژی را به شکل میدان مغناطیسی ایجاد شده در یک سیم‌پیچ ابررسانا ذخیره می‌کند، که در آن جریان به دلیل مقاومت نزدیک صفر بدون هیچ مانعی شارش می‌یابد. انرژی ذخیره شده در یک SMES عبارت است از:

$$E = \frac{1}{2} L I^2 \quad (2)$$

که در آن L اندوکتانس و I جریان هادی است.

مشابه با فلایویل‌ها، چگالی انرژی SMES توسط تئوری Virial محدود می‌شود، که باعث می‌شود این دستگاه‌ها برای کاربردهای انرژی فشرده مناسب نباشند. از سوی دیگر،



شکل (۲). تغییرات چگالی جریان در دماهای مختلف بر حسب میدان مغناطیسی

۴-۲- تحلیل برودتی

استفاده عملی از مواد ابررسانا امروزه نیز مستلزم استفاده از برودتی است تا به دمای کاری کمتر از دمای بحرانی ابررسانا دست یابد. بنابراین، لازم است در هنگام طراحی آهنربا، تجزیه و تحلیل برودتی برای تعیین تلفات حرارتی آهنربا انجام شود و روش خنک‌سازی مناسب انتخاب گردد.

تلفات حرارتی: تلفات برودتی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: گروه اول شامل "تلفات تبادل حرارتی" از انتقال حرارت همرفت، هدایت و تشعشع و گروه دوم، "تلفات الکتریکی" از تلفات اتصالات، جریان و تلفات AC تشکیل شده است. در مورد یک SMES با قدرت بالا، تلفات حرارتی اصلی در طول فرایند شارژ و دشارژ به دلیل تلفات هیستریزس حاصل می‌شود. تلفات حرارتی در یک ذخیره‌ساز انرژی ابررسانا ناشی از تلفات هیستریزس است. هیستریزس یک پدیده فیزیکی است که در طول فرایند شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی اتفاق می‌افتد و منجر به ایجاد انرژی حرارتی و افت انرژی می‌شود. این تلفات حرارتی می‌تواند باعث کاهش کارایی ذخیره‌ساز انرژی شود و نیاز بیشتر شارژ و دشارژ آن را داشته باشد. به علاوه، این تلفات حرارتی می‌تواند منجر به افزایش دما در داخل ذخیره‌ساز شده و در نتیجه کاهش عمر کاری و کارایی گسترده‌تر آن شود [۲۵]:

$$e_{hys} = \frac{2df}{3\pi} \int_0^{Bm} Jc dB \quad (10)$$

که در آن e_{hys} انرژی تلف شده حجمی در هر سیکل است، Bm میانگین میدان داخلی‌ترین لایه، و df قطر رشته ابررسانا است.

$$Jc = (4.401 \times 10^8) * (\exp(-(T/43.27)^{2.207})) * ((Bsc) + (0.7698))^{-(0.01107 * T - 0.177)} \quad (6)$$

$$Jc = Je$$

در این رابطه Bsc را می‌توان از مؤلفه‌های هندسی α و β سلنوئید و میدان مغناطیسی در مرکز آن محاسبه نمود:

$$k0 = \beta \ln \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{0.5}}{1 + (\beta^2)^{0.5}}$$

$$k2 = \left(\frac{1}{2\beta}\right) * (c_1^{1.5} - c_3^{1.5})$$

$$k4 = \left(\frac{1}{24\beta^3}\right) * (c_1^{1.5} (2 + 3c_2 + 15c_2^2)) -$$

$$c_3^{1.5} (2 + 3c_4 + 15c_4^2) \quad (7)$$

$$k6 = \frac{1}{240\beta^5} (c_1^{1.5} * (8 + 12c_2 + 15c_2^2 - 70c_2^3 + 315c_2^4)) -$$

$$(c_3^{1.5} (8 + 12c_4 + 15c_4^2 - 70c_4^3 + 315c_4^4))$$

$$Km = k0 - 0.5k2 + \left(\frac{3}{8}\right)k4 - \left(\frac{5}{16}\right)k6$$

$$Bsc = a_1 \mu_0 Jc Km$$

$c1, c2, c3$ و $c4$ در روابط فوق از رابطه (۸) محاسبه می‌شوند [۱۸]:

$$c1 = \frac{1}{1 + \beta^2}, c2 = \frac{\beta^2}{1 + \beta^2}, \quad (8)$$

$$c3 = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \beta^2}, c4 = \frac{\beta^2}{\alpha^2 + \beta^2}$$

همچنین میدان الکتریکی سیم پیچ برابر خواهد بود با:

$$E = \frac{1}{2} \mu_0 J_c^2 \frac{\gamma(\alpha, \beta) V_{coil}^2}{\pi a_1 (\alpha + 1)^2} \quad (9)$$

در رابطه فوق V_{coil} حجم سیم پیچ است. با توجه به روابط فوق، وابستگی چگالی جریان ذخیره‌ساز ابررسانا به دما و میدان مغناطیسی در شکل (۲) نشان داده شده است. با افزایش دما و افزایش میدان مغناطیسی، چگالی جریان الکتریکی SMES کاهش می‌یابد که این امر موجبات کاهش ظرفیت و ذخیره انرژی این ذخیره‌ساز را فراهم می‌کند.

(۳) نشان داده شده است.

۲-۳. تحلیل نتایج

به منظور بهینه سازی ابعاد ذخیره ساز انرژی ابررسانا، تابع هدف مطابق با رابطه (۱۲) در نظر گرفته شده است. متغیرهای سیم پیچ بکار رفته در این فرایند شامل مؤلفه های a_1 ، a_2 ، $2b$ در بازه حداقل مقادیر $[0/19 \ 0/19]$ و تا حداکثر مقادیر $[0/35]$ تعیین شده اند.

$$OF = \min[\omega_1 P_{loss} + \omega_2 C_{total}] \quad (12)$$

در این رابطه ω ضریب وزنی، P_{loss} تلفات کلی شامل هیستریزس و خنک کننده و C_{total} هزینه کل است.

داده های خروجی الگوریتم بهینه ساز برای مؤلفه های موثر هندسی سلنوئید، تلفات هیستریزس، تلفات خنک کننده و هزینه برای ذخیره ساز انرژی ابررسانای ۱ کیلوژول با و بدون در نظر گرفتن عامل هزینه در دمای ۲۰ درجه کلوین در جدول (۱) نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، در نظر گرفتن عامل هزینه علاوه بر اینکه ذخیره ساز را از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نموده است، از نقطه نظر مؤلفه های هندسی نیز شرایط را بهبود داده که در نهایت به کاهش تلفات ذخیره ساز منجر شده است.

جدول (۱). نتایج حاصل از بهینه سازی برای دمای ۲۰ درجه کلوین

شرایط بهینه سازی	β	α	تلفات هیستریزس (j)	تلفات خنک کنندگی (j)	هزینه (\$)
بدون در نظر گرفتن هزینه	۱/۷۵	۱/۳۷	۱۰۵	۱۵	۱۵۰۰۰
با در نظر گرفتن هزینه	۱/۵۸	۱/۲۷	۱۰۰	۱۳	۱۰۰۰۰

بهینه سازی انجام شده تنها در یک سطح انرژی ارائه شده است. این در حالی است که با افزایش انرژی، ابعاد ذخیره ساز انرژی به شدت تحت تأثیر آن بزرگ تر شده و لازم است تا بهینه سازی برای آن سطوح از انرژی انجام شود. جدول (۲) نتایج بهینه سازی را برای مقادیر مختلف ظرفیت انرژی ارائه داده است. مطابق با اطلاعات آورده شده، تمامی مؤلفه های با افزایش انرژی روند افزایشی را از خود نشان داده اند. مقایسه نتایج در جدول (۲) تأثیر عامل هزینه در الگوریتم بهینه سازی را به وضوح نشان می دهد. به عنوان مثال، در نظر گرفتن عامل هزینه، تلفات هیستریزس را برای ذخیره ساز ۱، ۱۰۰ و ۱۰۰۰۰ کیلوژول به ترتیب ۴/۷، ۹ و ۹/۱ درصد و بر اساس مقادیر α و β حجم بهینه سلنوئید را ۶۲، ۵۴ و ۵۹ درصد کاهش داده است.

• **تلفات خنک کننده:** روش های خنک سازی سیم پیچ های ابررسانا را می توان در دو گروه [۲۵] دسته بندی نمود: سیستم های باز، که در آن سیم پیچ در حمام برودتی غوطه ور می شود، و سیستم های بسته، که در آن از خنک شوندگی اجباری استفاده می شود. در اولی، سیم پیچ در تماس نزدیک با یک منبع سرمایشی قرار دارد و در روش دوم، جریانی برودتی که قبلاً توسط یک خنک کننده خنک شده است، جریان یابد. با توجه به اینکه راندمان سیستم خنک کنندگی پایین است، عملکرد آن بر راندمان کل سیستم تأثیر بسزایی خواهد داشت. از این رو در نظر گرفتن تلفات این سیستم بسیار مهم تلقی می گردد. تلفات ناشی از خنک شدگی برابر است با:

$$e_{diss} = \frac{0.4}{a_1^2 \left[1 + \frac{\alpha^2 - 1}{2 \ln \alpha} (\ln(\frac{\alpha^2 - 1}{2 \ln \alpha}) - 1) \right]} \quad (11)$$

۳- بهینه سازی و تحلیل نتایج

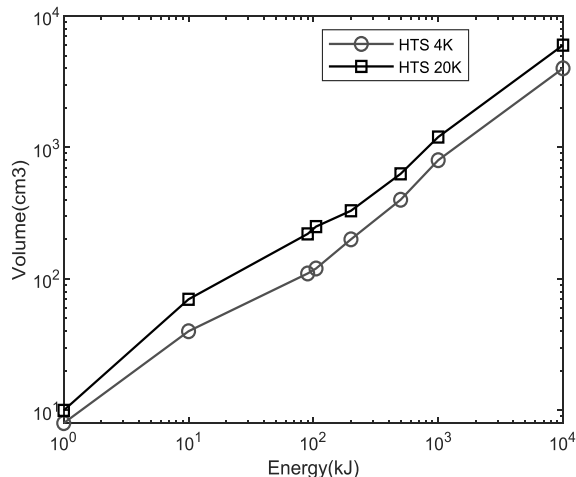
۳-۱. الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری

در این بخش از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری به منظور بهینه نمودن ابعاد سلنوئید HTS استفاده شده است. الگوریتم GWO می تواند عملکرد کارآمدی را در مقایسه با سایر بهینه سازی ای معرفی شده نشان دهد. از مزایای بزرگ این GWO این است که الگوریتمی ساده، انعطاف پذیر، قوی و آسان برای پیاده سازی است. همچنین مؤلفه های کنترلی کمتری برای تنظیم وجود دارد. رفتار و عملکرد اصلی این الگوریتم تقلید شده از رفتار گرگ خاکستری در طبیعت برای شکار است. علاوه بر سلسله مراتب اجتماعی، گرگ های خاکستری روش بسیار خاصی برای شکار استراتژی منحصربه فردی دارند که به صورت دسته جمعی شکار کرده و به صورت گروهی باهم کار می کنند تا طعمه را از گله جدا کنند، سپس یک یا دو گرگ به تعقیب و حمله به طعمه می پردازند. استراتژی شکار دسته گرگ عبارت است از:

- نزدیک شدن، دنبال کردن و تعقیب طعمه
- تعقیب، آزار و محاصره کردن در اطراف طعمه تا زمان متوقف شدن حرکت آن
- حمله به طعمه وقتی که طعمه خسته شود

برای مسئله بهینه سازی، هر مرحله به ترتیب با مؤلفه های آلفا، بتا و دلتا و سایر راه حل ها با امگا مشخص می شود. بر این اساس فرآیند بهینه سازی با انجام دادن سه راه حل به بهترین شکل پیش می رود. همچنین در این مسئله طعمه راه حل بهینه سازی خواهد بود [۲۶]. الگوریتم روش بهینه سازی در شکل

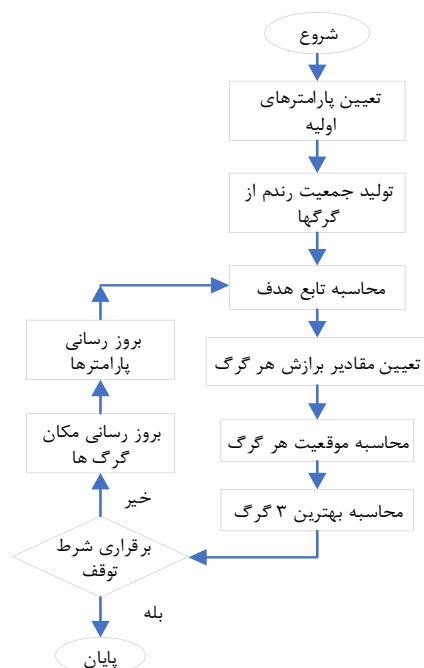
تغییر دمای عملیاتی عامل مهمی بر تغییر مؤلفه‌های عملکرد ابررسانا محسوب می‌شود. بر این اساس تأثیر این مؤلفه بر عملکرد سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابررسانا مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.



شکل (۴). حجم هادی بر حسب انرژی ذخیره‌شده

شکل (۴) رابطه بین توان ذخیره‌ساز ابررسانا و حجم بهینه را برای دو دمای ۴ و ۲۰ کلوین نشان می‌دهد. نوارهای ابررسانا در دمای پایین‌تر قابلیت انتقال انرژی الکتریکی بیشتری را از خود دارا هستند. بر این اساس ممکن است تعداد نوارها در لایه ابررسانا در دمای ۴ درجه کلوین کمتر از دمای ۲۰ درجه کلوین باشد. به بیان دیگر می‌توان گفت، در یک حجم ثابت، عملکرد نوار ابررسانا در دمای ۴ درجه کلوین بهتر از دمای ۲۰ درجه کلوین است. مطابق با این شرایط، همان‌طور که در شکل هم نشان داده شده است، ذخیره‌ساز در دمای کمتر نیاز به حجم ساختاری کمتری در مقایسه با دمای ۲۰ درجه کلوین دارد.

شکل (۵) تلفات هیستریزیس محاسبه‌شده به‌عنوان تابعی از انرژی با در نظر گرفتن عامل هزینه و بدون آن را برای دو دمای ۴ و ۲۰ درجه کلوین نشان می‌دهد. با توجه به شکل کاملاً مشخص است که تأثیر دما بر تلفات هیستریزیس ناچیز و در نظر گرفتن عامل هزینه موجب کاهش تلفات شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که افزایش انرژی در این شرایط به‌واسطه تلفات هیستریزیس می‌تواند محدود گردد. درواقع پیروی از یک تابع‌نمایی افزایشی موجب افزایش بسیار زیاد تلفات درازای افزایش کمی در انرژی شده است.



شکل (۳). فلوچارت بهینه‌سازی ابعاد ذخیره‌ساز انرژی ابررسانا با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری

جدول (۲). نتایج حاصل از بهینه‌سازی ذخیره‌ساز ابررسانا برای دمای ۲۰ درجه کلوین برای سطوح انرژی مختلف

بدون در نظر گرفتن هزینه					
انرژی (kJ)	۱	۱۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰
β	۱/۷۵	۴/۴	۸/۲۵	۱۳/۶۵	۱۹/۴
α	۱/۳۴	۱/۲۳	۱/۲۲	۱/۱۲	۱/۲۵
تلفات هیستریزیس (ژول)	۱۰۵	۷۷۰	۲۲۰۰	۱۶۵۰۰	۱۱۰۰۰۰
تلفات خنک‌کنندگی (ژول)	۱۵	۴۸	۱۲۷	۲۴۰	۳۸۶
هزینه (دلار)	۱۵۰۰۰	۲۶۰۰۰	۵۱۰۰۰	۱۷۲۰۰۰	۹۶۸۰۰۰
با در نظر گرفتن هزینه					
انرژی (kJ)	۱	۱۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰
β	۱/۵۸	۳/۲	۶/۷۵	۱۱/۴۲	۱۷/۵
α	۱/۲۷	۱/۰۳	۱/۱۵	۱/۰۵۲	۱/۱۷
تلفات هیستریزیس (ژول)	۱۰۰	۷۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
تلفات خنک‌کنندگی (ژول)	۱۳	۴۰	۱۱۵	۲۳۰	۳۵۰
هزینه (دلار)	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۸۰۰۰۰۰

همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، در حالت دوم که تأثیر ضریب تلفات نصف شده است، مؤلفه‌های هندسی به‌طور میانگین در حدود ۱۰ درصد، تلفات در حدود ۶ درصد و هزینه ۵ درصد نسبت به حالت اول افزایش یافته است. این در حالی است که مؤلفه‌های هندسی برای حالت سوم به دلیل کاهش تأثیر هزینه در بهینه‌سازی کاهش یافته است که منجر به ابعادی بزرگ‌تر برای ذخیره‌ساز شده است. تحت این شرایط، اگرچه تلفات افزایش یافته است اما درصد تغییرات آن کمتر از ۴ درصد بوده است که نسبت به حالت دوم کمتر است. با این وجود هزینه کل با رشد ۱۷/۵ درصدی نسبت به تمام حالت‌ها افزایش یافته است که نشان‌دهنده تأثیر بسیار زیاد عامل هزینه در بهینه‌سازی ذخیره‌ساز انرژی ابرسانا است.

جدول (۳). تأثیر تغییرات ضریب وزنی بر مؤلفه‌های بهینه‌سازی

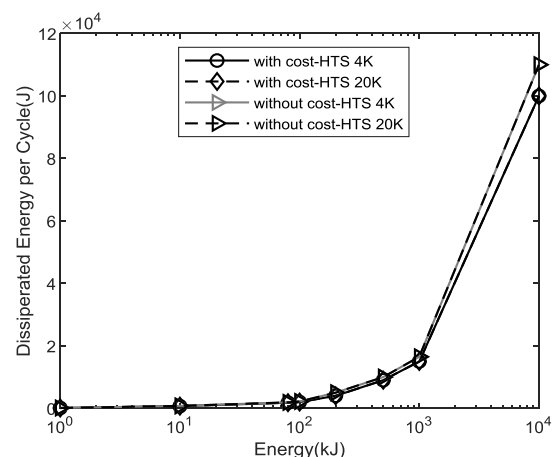
شرایط بهینه‌سازی	β	α	تلفات هیستریزس (j)	تلفات خنک‌کنندگی (j)	هزینه (\$)
$\omega_1=1, \omega_2=1$	۶/۷۵	۱/۱۵	۲۰۰	۱۱۵	۴۰۰۰
$\omega_1=0.5, \omega_2=1$	۷/۱۳	۱/۳۲	۲۱۵۰	۱۲۰	۴۲۰۰۰
$\omega_1=1, \omega_2=0.5$	۶/۱۲	۱/۰۱	۲۱۰۰	۱۱۸	۴۷۰۰۰

۳-۳. مقایسه عملکرد بهینه‌ساز گرگ خاکستری با الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات

در این بخش، به منظور بررسی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، عملکرد این الگوریتم با عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات مقایسه شده است. الگوریتم ژنتیک یک تکنیک کارآمد و موثر برای حل مسائل بهینه‌سازی است. درک مفهوم آسانی داشته ولیکن این الگوریتم اندکی زمان‌بر است. در بسیاری از مسائل، این الگوریتم تمایل به همگرایی به بهینه محلی دارد. الگوریتم ازدحام ذرات به دلیل مفهوم ساده، پیاده‌سازی آسان و همگرایی سریع، در انواع مختلف مسائل بهینه‌سازی توجه زیادی را به خود جلب نموده است. اگرچه، عملکرد این نوع الگوریتم به‌طور قابل‌توجهی به تنظیم مناسب مؤلفه‌های آن بستگی دارد. شبیه‌سازی در این قسمت باهدف بهینه‌سازی ابعاد ذخیره‌ساز انرژی ابرسانا با در نظر گرفتن تابع هزینه و کاهش تلفات انجام شده است.

جدول (۴). نتایج حاصل از بهینه‌سازی الگوریتم‌های گرگ خاکستری، ژنتیک و ازدحام ذرات

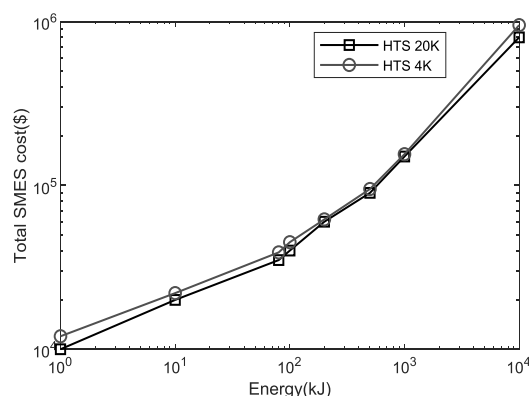
انرژی ذخیره‌ساز	1 kj
-----------------	------



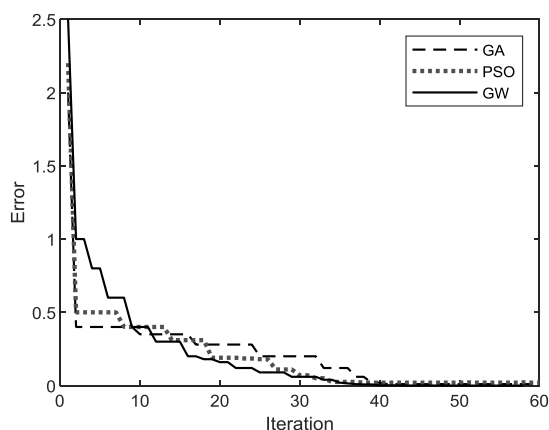
شکل (۵). تغییرات تلفات هیستریزس برحسب افزایش انرژی در دو دمای عملیاتی ۴ و ۲۰ درجه کلوین با و بدون در نظر گرفتن هزینه

شکل (۶) هزینه کامل SMES را برای سطوح انرژی مختلف با در نظر گرفتن عامل هزینه نشان می‌دهد. اگرچه استفاده از HTS مقدار هادی را کاهش می‌دهد، هزینه اولیه زیاد و ویژگی‌های هندسی نامطلوب نوار، استفاده از آن را در کاربردهای توان بالا محدود می‌کند. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، هزینه‌های خنک‌کننده را می‌توان با دمای عملیاتی بالاتر بهبود بخشید. با این وجود در برخی از سطوح انرژی، تأثیر دما بر هزینه کل ناچیز بوده و تغییرات ملموسی دیده نمی‌شود.

نتایج ارائه شده در این بخش بر اساس وزن‌های یکسان برای مؤلفه‌های تابع هدف نشان داده شده است. مطابق با این شرایط، تأثیر هر دو عامل تلفات و هزینه برای کمینه‌سازی تابع هدف برابر در نظر گرفته شده است. این در حالی است که تغییر میزان تأثیرگذاری هر یک نقش مهمی بر هزینه کل خواهد داشت. بر این اساس جدول (۳) نتایج به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی را برای دو سناریو وابسته به تغییرات وزنی در مقدار ۱۰۰ کیلوژول نشان می‌دهد.



شکل (۶). هزینه کل برحسب تغییرات انرژی با در نظر گرفتن عامل هزینه در بهینه‌سازی در دو دمای عملیاتی ۴ و ۲۰ درجه کلوین



شکل (۷). نمودار همگرایی الگوریتم‌های بکار گرفته‌شده

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی ابعادی ذخیره‌ساز انرژی ابررسانای دما بالا با در نظر گرفتن قید اقتصادی در راستای کمینه‌سازی تلفات هیستریزیس و خنک‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری مورد استفاده قرار گرفت. هدف از این کار بررسی و مطالعه فاکتور هزینه‌بر ابعاد بهینه ذخیره‌ساز انرژی دما بالا در سطوح انرژی مختلف بوده است. همان‌طور که از نتایج استنباط گردید، مقادیر بهینه، هزینه و همچنین تلفات به انرژی ذخیره‌ساز ابررسانا وابسته می‌باشند. همچنین دمای کاری HTS بر هزینه کل تأثیرگذار بوده و دمای برودتی کمتر موجبات افزایش هزینه را فراهم می‌سازد. از طرفی، تلفات هیستریزیس به دمای برودتی وابستگی چندانی نداشته و تنها تابعی از انرژی ذخیره‌ساز ابررسانا است. به‌طور کلی در نظر گرفتن عامل هزینه موجب می‌گردد تا ابعاد ساختاری مقرون‌به‌صرفه با تلفات هیستریزیس و خنک‌ساز قابل قبول برای ذخیره‌ساز انرژی به دست آید. با در نظر گرفتن عامل هزینه، تلفات هیستریزیس برای ذخیره‌ساز ۱، ۱۰۰ و ۱۰۰۰۰ کیلوژول به ترتیب ۴/۷، ۹ و ۹/۱ درصد و حجم بهینه سلونوئید ۶۲، ۵۴ و ۵۹ درصد کاهش را نشان می‌دهند. همچنین بررسی نتایج در دو سناریو دیگر نشان از اهمیت بسیار زیاد ضریب وزنی تلفات بر هزینه پروسه بهینه‌سازی دارد.

۵- مراجع

- [1] R. C. Dugan, *Electrical power system quality*. The McGraw Hill Companies, 2000. Accessed: Dec. 31, 2023.
- [2] M. Yazdani-Asrami, S. A. Gholamian*, M. Mirimani, J. Adabi Firuzjaie, "Numerical Modelling for AC Loss of the Second Generation HTS Tapes Under Alternating External Magnetic Fields Using the Finite Element Method," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 4, no. 3, 2016, 20.1001.1.26455153.1395.4.3.4.0, (in Persian)

شرایط بهینه‌سازی	تلفات هیستریزیس (j)	تلفات خنک‌کنندگی (j)	هزینه (\$) تکرار	زمان شبیه‌سازی (s)
الگوریتم گرگ خاکستری	۱۰۰	۱۳	۱۰۰۰۰	۱۵۰
الگوریتم ژنتیک	۱۰۲	۱۴/۲	۱۲۵۰۰	۸/۸
الگوریتم ازدحام ذرات	۱۰۱/۵	۱۳/۵	۱۱۰۰۰	۶/۵
انرژی ذخیره‌ساز	1000kj			
شرایط بهینه‌سازی	تلفات هیستریزیس (j)	تلفات خنک‌کنندگی (j)	هزینه (\$) تکرار	زمان شبیه‌سازی (s)
الگوریتم گرگ خاکستری	۱۰۰۰۰۰	۳۵۰	۸۰۰۰۰۰	۱۵۰
الگوریتم ژنتیک	۱۰۷۰۰۰	۳۷۵	۹۰۴۰۰۰	۱۳/۶
الگوریتم ازدحام ذرات	۱۰۵۰۰۰	۳۶۸	۸۷۵۰۰۰	۱۲/۳

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و عملکرد الگوریتم‌های بکار گرفته‌شده در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول (۴) کاملاً مشخص است که عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری نسبت به دو الگوریتم دیگر در دستیابی به ابعاد بهینه ذخیره‌ساز انرژی ابررسانا دارای کارایی بهتری است و نتایج حاصل از این الگوریتم منجر به تلفات و هزینه کمتری در مقایسه با دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات شده است.

ولیکن همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است زمان شبیه‌سازی این الگوریتم از دو الگوریتم دیگر اندکی بیشتر است. در شکل (۷) نمودار همگرایی الگوریتم‌های بکار گرفته‌شده نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده الگوریتم گرگ خاکستری در ارائه نتایج باکیفیت برتر با تکرارهای معقول قابل اعتمادتر است و از همگرایی زودرس فرایند جستجو به نقطه بهینه محلی جلوگیری می‌کند و کاوش برتر مسیر جستجو را فراهم می‌کند.

- Cryogenics, vol. 80, pp. 74–81, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.09.009>
- [16] Y. Li et al., “Stress reduction and storage capacity enhancement of the HTS-SMES using reinforcing overbanding structure,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, pp. 1–5, 2017, 10.1109/TASC.2017.2652321
- [17] Y. Xu et al., “A study on the design and comparison of 1–100-MJ-class SMES magnet with different coil configurations,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 5, pp. 1–9, 2017, 10.1109/TASC.2017.2707669
- [18] U. Bhunia, S. Saha, and A. Chakrabarti, “Design optimization of superconducting magnetic energy storage coil,” Phys. C Supercond., vol. 500, pp. 25–32, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.physc.2014.02.019>
- [19] A. Morandi, B. Gholizad, and M. Fabbri, “Design and performance of a 1 MW-5 s high temperature superconductor magnetic energy storage system,” Supercond. Sci. Technol., vol. 29, no. 1, p. 015014, 2015, 10.1088/0953-2048/29/1/015014.
- [20] J. Gómez, B. Pérez, P. Suárez, A. Álvarez, and B. Rivera, “Theoretical and experimental studies of SMES configurations for design optimization,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31, no. 5, pp. 1–5, 2021, 10.1109/TASC.2021.3059609
- [21] T. Wang, K. Ding, S. Du, and C. Zou, “Study on Electromagnetic Stress Optimization and its Resistant Structure in Toroidal HTS Magnet Applied in High-Energy Storage Density SMES,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31, no. 8, pp. 1–5, 2021, 10.1109/TASC.2021.3107822
- [22] C. Hernando, J. Munilla, L. García-Tabarés, and G. Pedraz, “Optimization of High Power SMES for Naval Applications,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 33, no. 5, pp. 1–5, 2023, 10.1109/TASC.2023.3250169
- [23] Y. Qiu et al., “Optimization Design of 30 MJ/5 MW LIQHYSMES Toroidal D-Shaped Magnet,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 2024, 10.1109/TASC.2008.921968
- [24] X Zhou, Y Tang, Sh Jing, Ch Zhang, Kang Gong, L Zhang, Y Li, “Cost Estimation Models of MJ Class HTS Superconducting Magnetic Energy Storage Magnets, IEEE Trans. Appl. Supercond, vol. 28, no. 4, pp. 511–536, 2018, 10.1109/TASC.2018.2821363
- [25] M. Li et al., “Engineering design of forced-flow cooling HTS
- [26] cable for SMES system with high current capacity,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 2023, 10.1109/TASC.2023.3346831
- [27] Y. Iwasa, “AC and other losses, in Case Studies in Superconducting Magnets: Design and Operational” New York, NY, USA: Springer, Vol:2, pp. 399–466ed, 2009.
- [28] S. Mahapatra, M. Badi, S. Raj, “Implementation of PSO, it’s variants and Hybrid GWO-PSO for improving Reactive Power Planning,” Conference for Advancement in Technology, 2019, 10.1109/GCAT47503.2019.8978348
- [3] S. M. Seyyed Barzegar*, M. Khodsuz, “Magnetic and Electric Fields Minimization of Transmission Lines Using NSGA-II Algorithm Based on Multi-Objective Optimization” Journal of Applied Electromagnetics, vol. 7, no. 2, 2020, 20.1001.1.26455153.1398.7.2.10.5, (in Persian)
- [4] A. Bhardwaj et al., “Modeling and Measurements of Ramping Losses in HTS Coils for Pulsed Power Applications of SMES,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 34, no. 3, pp. 1–7, May 2024, doi: 10.1109/TASC.2024.3356427.
- [5] M. R. Alizadeh Pahlavani, V. Zamani Faradonbeh “Optimal Pole-Shaping in Surface-Mounted PM Machines using Analytical Modeling: Cogging Torque and Flux Density Harmonics” Journal of Applied Electromagnetics, vol. 2, no. 3, 2015, 20.1001.1.26455153.1393.2.3.3.5., (in Persian)
- [6] Q. Lu, R. Yan, Y. Yang, and X. Yang, “Supply Chain Specific Investments and Enterprise Performance of SMEs: A Resource Orchestration Perspective,” IEEE Trans. Eng. Manag., vol. 71, pp. 5487–5505, 2024, doi: 10.1109/TEM.2024.3362997.
- [7] S. A. Fazljoo, A. A. Damaki Aliabadi *, “Design and test of a superconducting magnetic energy storage (SMES) coil,” I Scientific Journal of Applied Electromagnetics., vol. 11, no. 1, 2016, 20.1001.1.26455153.1402.11.1.12.3, (in Persian)
- [8] C. A. Borghi, M. Fabbri, and P. L. Ribani, “Design optimization of a microsuperconducting magnetic energy storage system,” IEEE Trans. Magn., vol. 35, no. 5, pp. 4275–4284, 1999, 10.1109/20.799077
- [9] K. Higashikawa, T. Nakamura, T. Hoshino, and I. Muta, “Design of Bi-2223/Ag coil based on genetic algorithm and finite element method,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 1895–1898, 2005, 10.1109/TASC.2005.849326
- [10] A. Korpela, J. Lehtonen, and R. Mikkonen, “Optimization of HTS superconducting magnetic energy storage magnet volume,” Supercond. Sci. Technol., vol. 16, no. 8, p. 833, 2003, 10.1088/0953-2048/16/8/301
- [11] S. Noguchi, H. Yamashita, and A. Ishiyama, “An optimal design method for SMES coils using HTS tapes,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 12, no. 1, pp. 1459–1462, 2002, 10.1109/TASC.2002.1018677
- [12] S. wak et al., “The optimal design of 600 kJ SMES magnet based on stress and magnetic field analysis,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 18, no. 2, pp. 713–716, 2008, 10.1109/TASC.2008.922523
- [13] J.-M. Rey et al., “Geometry optimization for SMES solenoids using HTS ribbons,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, pp. 1670–1673, 2010, 10.1109/TASC.2010.2095402
- [14] F. Trillaud and L. S. Cruz, “Conceptual Design of a 200-kJ 2G-HTS Solenoidal μ -SMES,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 24, no. 3, pp. 1–5, 2013, 10.1109/TASC.2013.2284478
- [15] A. Hekmati and R. Hekmati, “Double pancake superconducting coil design for maximum magnetic energy storage in small مقیاس SMES systems,”