



Optimization of Nuclear Reactor Power with Control Rods Driven by Switched Reluctance Motor (SRM) with Differential Evolution and Firefly Algorithms

Farzaneh Mohammadi^{1*}, Mohammad Molaei², Omid Afra³

¹Faculty Member, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Shahid Beheshti, Alborz Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Former M.Sc. Student, Power Plant Manager of ITCO Company, Tehran, Iran.

³PhD, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Shahid Beheshti, Alborz Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 09.27.2020

Revised: 11.14.2020

Accepted: 01.19.2021

Keyword:

Small Modular Reactor Control Rod

Switched Reluctance Motor
Firefly Algorithm

Differential Evolution Algorithm

***Corresponding Author:**

Farzaneh Mohammadi

Email:

farzane_mohammade@yahoo.com

ABSTRACT

Over the previous few decades, bio-inspired (BI) organic process improvement techniques have experienced extraordinary popularity in the field of engineering. These techniques gift a troublesome competition to ancient numerical procedures that suffer from convexity and continuity assumptions and that usually use a gradient based mostly search that's sensitive to the initial resolution. Whereas initial BI techniques specially have been investigated by novel and improved variants. The population primarily based computing strategies are notably engaging for finding multi-objective (MO) problems due to their capability of producing an outsized variety of Pareto-optimal solutions in one run. In this paper, two algorithms of firefly and differential evolution concept is proposed as a performance metrics for switched reluctance motor (SRM) as control rod drive in small modular reactor. This work aims to prevail and amend the remarkable drawback of switched reluctance motor, which is torque ripple, by executed current control of the motor based on the PI controller in a closed-loop controller. Furthermore, the output power of the plant is optimized to trace the reference properly. The effectiveness and advantage of the system control scheme are presented in MATLAB software in real-time.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تفاهول و حرفه‌ای

کارافان

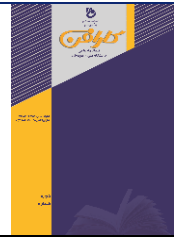
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

زمستان ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۴، ۹۷-۸۱

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.128397

20.1001.1.23829796.1399.17.4.5.3



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی توان راکتور هسته‌ای با درایو موتور رلوکتانس سوئیچی به کمک الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و کرم شب‌تاب

فرزانه محمدی*^۱، محمد مولایی^۲، امید افرا^۳

- ۱- عضو هیئت علمی، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شهید بهشتی پسران کرج، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان البرز، ایران.
- ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مدیر نیروگاه ایتکو، تهران، ایران.
- ۳- دکتری، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شهید بهشتی پسران کرج، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان البرز، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در چند دهه اخیر، تکنیک‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت، محبوبیت ویژه‌ای را در مهندسی تجربه کرده‌اند. این تکنیک‌ها رقابت سختی را در مقایسه با روش‌های عددی سنتی دارند که گرفتار پیچیدگی پیوستگی هستند و معمولاً از یک جستجوی مبتنی بر گرادیان حساس به راه‌حل اولیه، استفاده می‌کنند. درحالی‌که تکنیک‌های الهام گرفته از طبیعت اولیه به‌طور خاص توسط متغیرهای بهبودیافته و تکاملی، بررسی شده‌اند. روش‌های محاسبه مبتنی بر جمعیت به‌ویژه برای حل مشکلات چندهدفه به دلیل توانایی تولید راه‌حل‌های بهینه پارتو در یک اجراء جذاب هستند. در این مقاله از دو الگوریتم تکامل تفاضلی و کرم شب‌تاب به‌عنوان معیارهای عملکرد موتور رلوکتانس سوئیچی به‌عنوان درایو میله کنترل در یک نیروگاه هسته‌ای استفاده شده است. این کار، با هدف غلبه و بهبود بخشیدن بر نقطه‌ضعف قابل توجه موتور رلوکتانس سوئیچی که دارای گشتاور موج‌دار است، به کمک کنترل جریان موتور بر اساس کنترلر PI در یک کنترلر حلقه بسته، انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی، اثربخشی و مزیت عملکرد موتور رلوکتانس سوئیچی را در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK در زمان واقعی، نشان می‌دهد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

کلید واژگان:

راکتور هسته‌ای
میله کنترل
موتور رلوکتانس سوئیچی
الگوریتم کرم شب‌تاب
الگوریتم تکامل تفاضلی

*نویسنده مسئول: فرزانه محمدی

پست الکترونیکی:

farzane_mohammade@yahoo.com



© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

بهینه‌سازی، نوعی تصمیم‌گیری یا به‌طور خاص‌تر، یکی از مهم‌ترین ابزارهای کمی در تصمیم‌گیری است که برای بهینه‌سازی یک یا چند هدف تحت شرایط تعیین شده خاص می‌باشد. مشکلات بهینه‌سازی از نظر ماهیت، بسیار فراگیر هستند؛ زیرا بسیاری از مشکلات زندگی واقعی را می‌توان از نظر مدل‌های بهینه‌سازی، بر اساس معیارها و اهداف مختلفی، فرمول‌بندی کرد. کاربرد آن، زمینه‌های مختلفی را از جمله ریاضیات، علوم محاسباتی، تحقیقات کاربردی، مهندسی، اقتصاد، فیزیک، زیست‌شناسی و غیره تشکیل می‌دهد [۱]. بهینه‌سازی بازه گسترده‌ای از تحقیقات است که روش خاصی را برای حل مرتبه خاصی از مشکلات مانند مشکلات برنامه‌نویسی خطی، مشکلات برنامه‌نویسی عدد صحیح، مشکل برنامه‌نویسی درجه دوم، بهینه‌سازی غیرمحدب و موارد دیگر ارائه می‌دهد. باین وجود پیچیدگی زمانی به وجود می‌آید که تشخیص ماهیت مشکل دشوار می‌شود. در چنین شرایطی وقتی ماهیت مسئله قابل پیش‌بینی نباشد، انتخاب روش مناسب برای به دست آوردن راه‌حل بسیار دشوار است؛ بنابراین محققان روی الگوریتم‌های عمومی متمرکز شده‌اند که قابل استفاده برای حل طیف گسترده‌ای از مشکلات است. چند دهه گذشته شاهد رونق چنین الگوریتم‌هایی با هدف کلی هستیم که می‌تواند تحت عنوان فراابتکاری قرار بگیرد که در این مقاله به دو نمونه تکامل تفاضلی و کرم شب‌تاب اشاره می‌گردد [۲].

امروزه درایوها سهم بزرگی از صنعت الکتروموتورها را از آن خود کرده‌اند. این درایوها باید خصوصیتی چون گشتاور بالا و چگالی قدرت بالا، دامنه سرعت گسترده در هنگام کار با برق ثابت، راندمان بالا در کلیه محدوده گشتاور و سرعت، قابلیت اضافه‌بار، استحکام بالا، قابلیت اطمینان بالا، تولید گشتاور کم و صدای کم و هزینه پایین داشته باشند [۳]. در حال حاضر، این الزامات با استفاده از موتورهای سه فاز آسنکرون، درایوهای موتور DC بدون جاروبک، موتور سنکرون آهنربای دائمی و موتور رلوکتانس سوئیچی^۱ قابل تحقق است [۴].

درایوهای رلوکتانس سوئیچی به دلیل مزایای واضح مانند ساختار ساده و مستحکم، رفتار مقاوم در برابر خطا، قابلیت کنترل ساده و خصوصیات سرعت گشتاور ممتاز، نسبت به سایر انواع درایوهای موتور برتر هستند. فقدان جاروبک باعث می‌شود موتور رلوکتانس سوئیچی قادر به کار با سرعت بالا و محدوده مشخصات قدرت ثابتی باشد. علاوه بر این، نبود آهن‌ربا به آن امکان می‌دهد از قابلیت خنک‌کننده برجسته در شرایط دمایی بالا برخوردار باشد. ویژگی‌های مطلوب بیان شده باعث می‌شود که در کاربردهای هسته‌ای از این دستگاه استفاده کنند. باین حال، بزرگ‌ترین اشکال عملکرد موتور رلوکتانس سوئیچی، موج گشتاور (ریپل) و لرزش است. بر همین اساس حل این نقطه‌ضعف باعث می‌شود تا موتور فوق بهترین نامزد در کاربرد راکتورهای هسته‌ای باشد.

در این مقاله عملکرد یک راکتور هسته‌ای مدولار کوچک با درایو موتور رلوکتانس سوئیچی به‌عنوان یک محرک میله کنترل، ارائه شده است. بررسی حاضر، مهم‌ترین نقطه‌ضعف موتور رلوکتانس سوئیچی را که موج‌دار بودن گشتاور است، برطرف می‌کند. یک کنترل‌کننده PI آفلاین در یک کنترلر حلقه بسته، برای کنترل قدرت یک راکتور مدولار کوچک استفاده می‌شود. ضرایب PI بهینه در نظر گرفته شده، از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی یعنی تکامل تفاضلی^۲ و کرم شب‌تاب^۳ به‌طور موازی به دست آمده است. برای به حداقل رساندن موج گشتاور، جریان موتور رلوکتانس سوئیچی توسط کنترلر PI تنظیم می‌شود که باعث کاهش نوسانات می‌شود. در پایان شبیه‌سازی در MATLAB/ SIMULINK، کارایی موتور رلوکتانس سوئیچی را تأیید می‌کند.

¹ Switched Reluctance Motor (SRM)

² Differential Evolution (DE)

³ Firefly Algorithm (FA)

کارهای انجام شده

انواع مختلفی از الگوریتم‌های فراابتکاری به‌منظور بهینه‌سازی در رابطه با مکانیزم مونتاژ سوخت و کنترل واکنش در راکتور هسته‌ای استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از آن عبارت‌اند از: بهینه‌سازی کلونی مورچگان [۵؛ ۶]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۷-۹]، بهینه‌سازی کلونی زنبور مصنوعی [۱۰؛ ۱۱]، الگوریتم جستجوی هارمونی [۱۲] و الگوریتم شب‌تاب پیوسته [۱۳؛ ۱۴]؛ که در مورد آخر، نویسندگان در مقاله خود چهار الگوریتم فراابتکاری، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم آنتروپی متقابل، کلونی زنبورهای مصنوعی و یادگیری افزایشی مبتنی بر جمعیت را براساس معیارهای فیزیکی راکتور به کار گرفتند. مرجع [۱۵] چندین الگوریتم را برای تعیین رویکردی مناسب برای حل مشکل بهینه‌سازی چندهدفه مدیریت سوخت در هسته راکتور مقایسه کرده است. همین نویسندگان در سال ۲۰۱۸ یک تکنیک فوق‌ابتکاری مبتنی بر چندین الگوریتم فرعی برای حل مسئله استفاده کردند [۱۶].

بررسی‌های بسیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است از جمله برخی نویسندگان [۱۷] مدیریت سوخت هسته‌ای در راکتورهای تحت فشار آب، راکتورهای آب جوشان، راکتورهای آب سنگین تحت فشار^۱ و راکتورهای اتمی سریع را بررسی کرده‌اند [۱۷]. در جوشکاری راکتورهای آب جوش، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی الگوی بارگیری و موقعیت‌یابی میله کنترل استفاده می‌شود [۱۸-۲۰]. در مراجع [۲۱؛ ۲۲] از الگوریتم فوق برای سوخت‌گیری آنلاین راکتور آب سنگین فشرده استفاده شده است. همچنین برای بهینه‌سازی بارگذاری توریم در هسته راکتور فوق، الگوریتم ژنتیک بررسی شد [۲۳].

مدل راکتور هسته‌ای

رفتار راکتور مدل شده در یک وضعیت پایدار، شامل یک گروه مؤثر از نوترون تأخیری در معادلات جنبشی ۱ و ۲ بیان می‌گردد:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho_{ext} + \rho_{fb} - \beta_{eff}}{\Lambda} P + \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} C \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \lambda(P - C) \quad (2)$$

که در آن P ، C ، ρ_{ext} ، ρ_{fb} ، β_{eff} ، λ_{eff} و Λ به ترتیب توان راکتور نرمالیزه شده، غلظت نرمال پیش ماده، اکتیویته خارجی تزریق شده به هسته، بازخوردهای ذاتی هسته، کسر مؤثر نوترون تأخیری، ثابت تأخیر پیش ماده مؤثر و میانگین زمان تولید نوترون است. افزایش دمای سوخت ناشی از گرمای شکافت تولیدشده در معادله (۳) نشان داده شده است. تعادل گرما در مایع خنک‌کننده اول و دوم مدل با ۱ سوخت و ۲ خنک‌کننده در معادلات (۴) و (۵) به شرح زیر است [۲۴].

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{PP_0}{\mu_f} - \frac{\Omega}{\mu_f} (T_f - T_{c1}) \quad (3)$$

$$\frac{dT_{c1}}{dt} = \frac{2\mu_i}{\mu_c} (T_{in} - T_{c1}) - \frac{\Omega}{\mu_c} (T_f - T_{c1}) \quad (4)$$

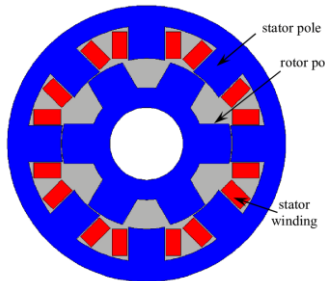
$$\frac{dT_{c2}}{dt} = \frac{2\mu_i}{\mu_c} (T_{c1} - T_{c2}) - \frac{\Omega}{\mu_c} (T_f - T_{c1}) \quad (5)$$

که T_{c1}, T_{c2} و T_f مربوط به دمای سوخت، درجه خنک‌کننده اول و درجه خنک‌کننده دوم است. μ_f, μ_i و μ_c به ترتیب نرخ جریان (دبی) در ظرفیت گرمای جریان ورودی، ظرفیت حرارتی سوخت و مایع خنک‌کننده را نشان می‌دهند. آهنگ تغییر اکتیویته خارجی در هسته، وابسته به واحد طول سرعت میله v_i و ارزش میله G_r به شرح معادله ۶ است:

$$\frac{d\rho_{ext}(t)}{dt} = G_r v_r(t) \quad (6)$$

موتور رلوکتانس سوئیچی

ساختار موتور رلوکتانس سوئیچی حاوی سیم‌پیچ استاتور و روتور بدون هادی و مغناطیس دائمی است. شکل ۱ موتور رلوکتانس سوئیچی ۸/۶، چهار فاز را نشان می‌دهد که دارای هشت قطب برجسته روی استاتور و شش قطب برجسته در روتور است. چهار فاز از سیم‌پیچ استاتور به صورت قطر متقارن سری توزیع می‌شود. سیم‌پیچ استاتور توسط یک مبدل نامتقارن نیم‌پل با دو عدد سوئیچ و دیود در هر فاز مطابق با شکل ۲ تغذیه می‌شود. در این ساختار با الگوریتم کلیدزنی منفرد سوئیچ‌ها به صورت جداگانه می‌توان جریان فاز استاتور را به طور مستقل کنترل کرد [۲۵].



شکل ۱. موتور سوئیچ رلوکتانسی ۸/۶، چهار فاز [۲۶]

مطابق استاندارد مدار الکتریکی، معادله ولتاژ فاز k^{th} به شرح معادله ۷ است [۲۷]:

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (7)$$

که R_k, i_k, ψ_k و U_k به ترتیب مقاومت، جریان، شار پیوندی و ولتاژ فاز k ام است. شار پیوندی فاز به شرح زیر است:

$$\psi_k = L_k(i_k, \theta_k) i_k \quad (8)$$

که در آن L_k اندوکتانس و θ_k موقعیت زاویه‌ای فاز است، گشتاور تولیدشده هر فاز با نادیده گرفتن اشباع مغناطیسی برای یک موقعیت روتور مشخص شده برابر است با:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{dt} \quad (9)$$

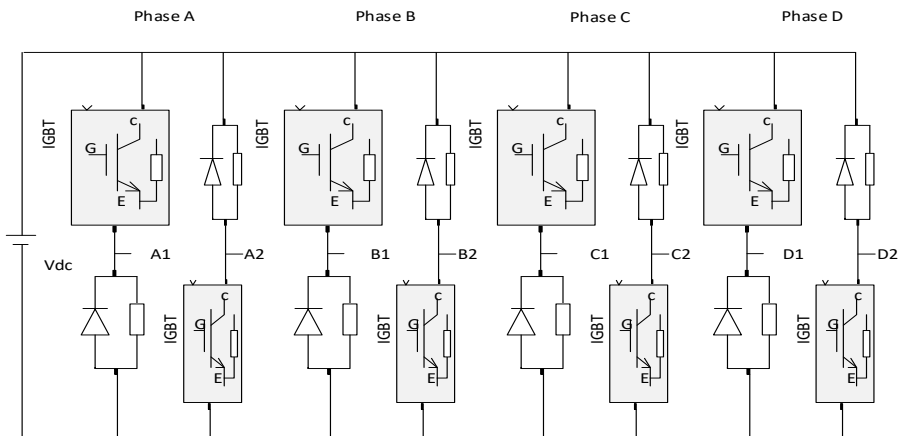
که حالت موتور و ژنراتور به ترتیب با مقدار مثبت و منفی $\frac{dL(\theta)}{dt}$ مرتبط است. گشتاور کل، مجموع گشتاور فازها است:

$$T_n = \sum_{j=1}^N T_n(\theta, j) \quad (10)$$

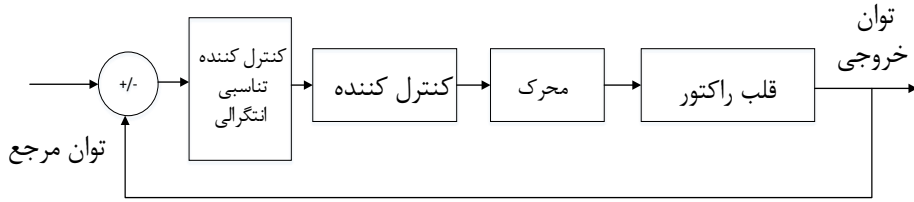
در رابطه فوق n تعداد فاز است. در شکل (۳)، شماتیکی از کنترل حلقه بسته نیروگاه هسته‌ای توضیح داده شده است. تابع انتقال موتور رلوکتانس سوئیچی بکار گرفته‌شده در این مقاله با رابطه زیر بیان می‌گردد [۲۸]:

$$G_{SRM} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (11)$$

k : به‌عنوان بهره‌ای شناخته می‌شود که از تقسیم سرعت حالت پایدار بر بار ماشین به دست می‌آید. τ : زمان افزایش به ۶۳ درصد از سرعت حالت پایدار است. در تابع انتقال فوق جریان به‌عنوان ورودی و سرعت به‌عنوان سیگنال خروجی استفاده شده است. در شکل ۳ همان‌گونه که مشاهده می‌شود بازخوردی از توان خروجی راکتور، پس از عبور از کنترل‌کننده پیشنهادی و تناسبی-انتگرالی وارد درایو رلوکتانس سوئیچی می‌شود. به‌عبارت‌دیگر کنترل‌کننده پیشنهادی جهت حذف نوسانات گشتاور و کنترل‌کننده تناسبی - انتگرال برای تطابق توان خروجی با توان مرجع استفاده می‌شود.

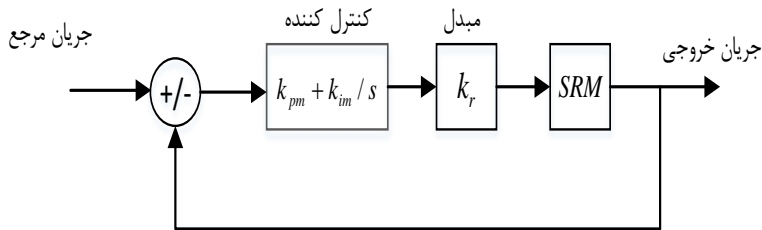


شکل ۲. مبدل نیم پل موتور رلوکتانس سوئیچی [۲۹]



شکل ۳. شماتیک کنترل قدرت هسته راکتور

از آنجا که اندوکتانس به موقعیت روتور و القای متقابل بین دو فاز مجاور بستگی دارد، دینامیک حلقه فوق متغیر با زمان و غیرخطی تعیین می‌گردد. با این وجود، برای دستیابی به عملکرد مطلوب، جریان فاز باید به وضوح کنترل شود. برای این منظور، از کنترلر جریان برای خطی سازی چرخه کنترل موجود استفاده می‌شود. خطی سازی بازخورد، سیستم غیرخطی را به صورت جبری به خطی تبدیل می‌کند. از این رو می‌توان از تکنیک‌های کنترل خطی استفاده کرد. سیستم کنترل جریان با استفاده از کنترلر کنبده PI مدل شده در شکل ۴ اساس کار را نشان می‌دهد [۲۹]. مدل کنترلی شکل ۴ به عنوان یک حلقه داخلی در نمودار بلوک کنترل مرکزی نیروگاه استفاده می‌شود. ضرایب کنترلر PI برای ردیابی تغییرات در شرایط کاری تنظیم می‌شود.



شکل ۴. حلقه کنترل جریان موتور رلوکتانس سوئیچی [۳۰]

الگوریتم کرم شب تاب

مسائل بهینه سازی مختلف برای یافتن راه حل های بهینه، از تکنیک های فراگرایی استفاده می کنند. الگوریتم کرم شب تاب در حال حاضر به عنوان یکی از این تکنیک ها در نظر گرفته شده است. این الگوریتم بر اساس وضعیت کرم شب تاب و سه اصل زیر است:

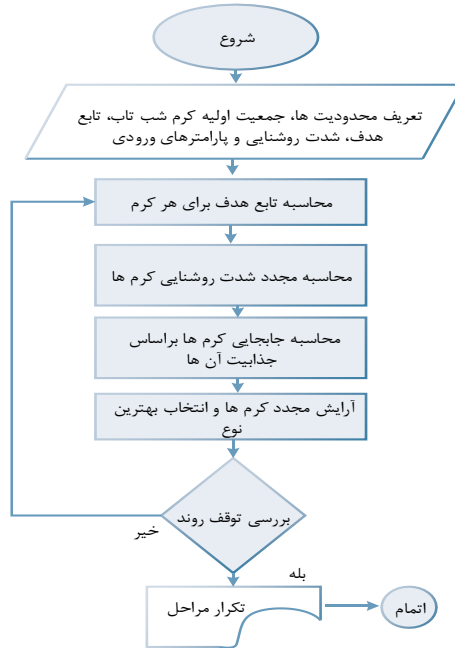
- ۱- کرم های شب تاب به دلیل جذابیت ناشی از ماهیت تک جنسیتی به یکدیگر جذب می شوند.
 - ۲- جذابیت مربوط به روشنایی است، به این معنی که کرم شب تاب روشن تر باعث جذب کمتری خواهد شد.
 - ۳- تابع هدف با خصوصیات روشنایی چشمک زن کرم شب تاب در ارتباط است.
- روش الگوریتم، مبتنی بر سه عامل است که عبارت اند از جذابیت، روش تصادفی سازی و جذب. جذابیت متناسب با شدت روشنایی است. تغییر جذابیت β به صورت زیر تعریف شده است:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (12)$$

که در آن r فاصله و β_0 جذابیت در $r=0$ است. فرض بر این است که موقعیت x_i و x_j به کرم شب‌تاب i و j اختصاص دارد. اگر مقدار جذابیت i از j بالاتر باشد، j توسط i انتقال می‌یابد:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-r r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha_t \varepsilon_i^t \quad (13)$$

در معادله فوق بخش دوم مربوط به جذابیت است و سومین بخش به تصادفی‌سازی با پارامتر α_t تعلق دارد. علاوه بر این، بردار ε_i^t یک عدد تصادفی است که از توزیع یکنواخت در t استخراج می‌شود. فلوجارت اصلی الگوریتم کرم شب‌تاب در شکل ۵ توضیح داده شده است.



شکل ۵. فلوجارت الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم تکامل تفاضلی

تکامل تفاضلی یک الگوریتم فراابتکاری، مبتنی بر جمعیت است که برای مسئله بهینه‌سازی فراتر از دامنه پیوسته توسعه یافته است. فرایند بهینه‌سازی از سه مرحله اصلی تشکیل شده است: جهش، تقاطع^۱ و انتخاب. جمعیت با بُعد D که تعداد متغیرهای کنترل را نشان می‌دهد، بردارهای با ارزش واقعی در پارامتر اولیه هستند. در هر نسل، جمعیت فعلی، بردارهای هدف می‌شوند. برای هر بردار هدف، با افزودن اختلاف وزن بین دو بردار به یک بردار سوم که به‌طور تصادفی تولید شده‌اند، بردار جهش تولید می‌شود. با عمل تقاطع پارامترهای بردار جهش با بردار هدف، بردار جدیدی به نام بردار آزمایش ایجاد می‌شود. اگر مقدار تابع هدف برای بردار آزمایشی مطلوب‌تر از مقدار آن برای

1 Crossover

بردار هدف باشد، آنگاه بردار آزمایشی جایگزین بردار هدف در نسل بعدی می‌شود. عملگرهای تکاملی در زیر شرح داده شده است:

مقداردهی اولیه

مقادیر اولیه جمعیت از محدوده مرز پایین x_j^l و مرز بالای x_j^u انتخاب می‌شوند.

جهش

بردار جهش $v_{i,G+1}$ توسط سه بردار تولید می‌شود $(x_{r1,G}, x_{r2,G}, x_{r3,G})$. اختلاف وزن بین دو بردار اضافه‌شده به بردار سوم به شرح زیر است:

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (14)$$

که F به‌طور پیوسته بین 0 تا 2 انتخاب می‌شود.

تقاطع

مرحله تقاطع از نسل واقعی $x_{i,G}$ و عناصر مربوط به مجموعه جهش $v_{i,G+1}$ به شرح زیر تولید می‌شود:

$$u_{j,i,G+1} = \begin{cases} v_{j,i,G+1} & \rightarrow r \leq CR \text{ or } i = k \\ x_{j,i,G+1} & \rightarrow r > CR \text{ or } i \neq k \end{cases} \quad (15)$$

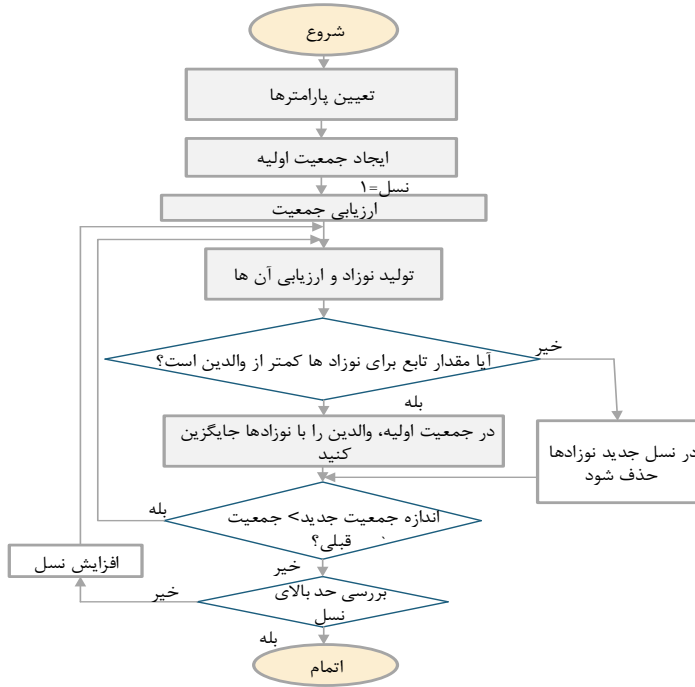
که در آن CR بین صفر و یک انتخاب می‌شود. این پارامتر نقش کنترلی دارد. علاوه بر آن، K عدد صحیح تصادفی از $(1, 2, \dots, D)$ است.

انتخاب

در این مرحله، تابع هدف برای $x_{i,G}$ و $v_{i,G+1}$ مقایسه و بردار مناسب برای نسل بعدی به شرح زیر انتخاب می‌شود:

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & \rightarrow f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \rightarrow \text{Otherwise } i \in [1, 2, \dots, D] \end{cases} \quad (16)$$

بدین ترتیب، تمام مراحل همان‌طور که در شکل ۶ آمده است، تکرار می‌گردد.



شکل ۶. فلوجارت الگوریتم تکامل تفاضلی

بهینه‌سازی چندهدفه

ضرایب کنترل‌کننده‌های PI، k_p ، k_c ، k_{pm} و k_{im} به‌عنوان پارامترهای کنترل برای بهینه‌سازی توان خروجی و موج‌های گشتاور استفاده می‌شود. تابع هدف بر اساس سیگنال خطای حلقه بسته توسعه یافته است. شاخص‌های عملکرد که بیانگر انتگرال سیگنال خطای مطلق^۱ و انتگرال مربع خطا^۲ است، به‌صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (۱۷)$$

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (۱۸)$$

نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله، شبیه‌سازی مدل راکتور و موتور رلوکتانس سوئیچی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام گردید. پارامترهای کنترل‌کننده PI به‌صورت آفلاین توسط الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب و تکامل تفاضلی در نرم‌افزار MATLAB تعیین شدند و هدف اصلی، ردیابی توان مرجع در راکتور موتور رلوکتانس سوئیچی است که این توان مرجع

1 Integral Absolute Error (IAE)

2 Integral Square Error (ISE)

دارای تغییرات ۱۰۰ درصد توان راکتور در ۲۰۰ میلی‌ثانیه اول، سپس کاهش نرم توان به ۵۰ درصد مقدار نامی در ۲۰۰ میلی‌ثانیه دوم و در آخر افزایش شیب‌دار توان به ۱۰۰ درصد مقدار نامی در ۲۰۰ میلی‌ثانیه آخر هست که شکل پالس را می‌سازد.

($100\% P \leftarrow 50\% P \leftarrow 100\% P$ در ۶۰۰ sec در نظر گرفته شده است). همچنین مقادیر پارامترهای اولیه مطابق جدول ۱ در مرجع [۲۶] است.

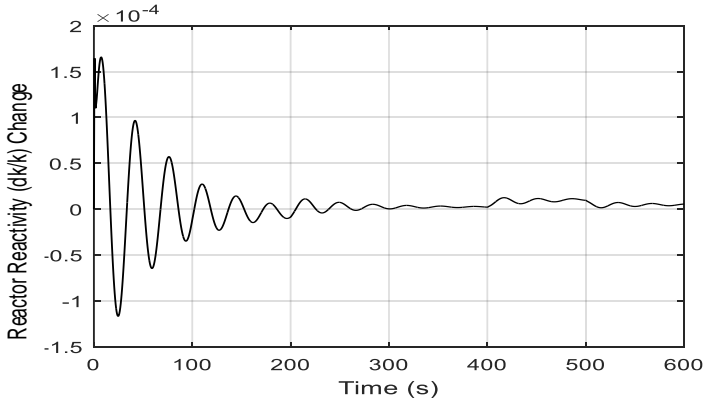
پاسخ بخش‌های مختلف نیروگاه حلقه بسته در شکل‌های (۷) تا (۱۱) برای موتور نشان داده شده است. الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و کرم شبتاب، شاخص‌های عملکرد را همان‌طور که از شکل (۱۴ و ۱۵) مشخص است، بهینه‌سازی می‌کنند. فرایند بهینه‌سازی در ۳۰ نسل و ۴۰ نمونه واقع در مجاورت نقطه بهینه انجام شده است.

مقادیر محاسبه‌شده بهینه کنترلرهای PI و تابع هدف در جدول (۱) برای هر دو الگوریتم و موتور به نمایش در آمده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد و رفتار همگرایی موتور رلوکتانس سوئیچی را تأیید می‌کند. دو الگوریتم بهینه‌سازی به‌موازات هم تأیید شدند تا اثربخشی روش پیشنهادی را نشان دهند.

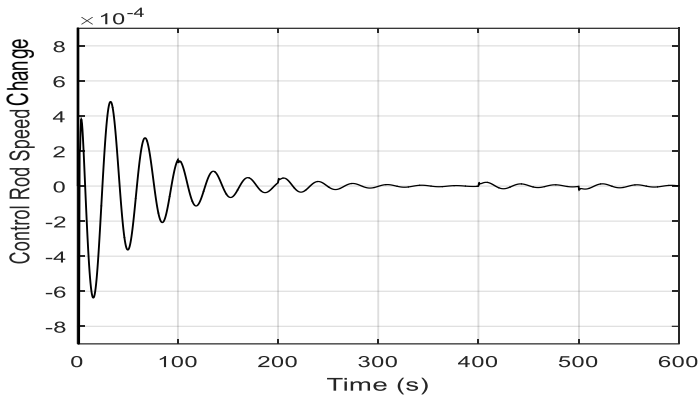
در این راکتور با درایو موتور رلوکتانس سوئیچی، شکل‌های ۷ تا ۱۰ به ترتیب اکتیویته ورودی قلب راکتور، سرعت میله کنترل، تغییرات دمای سوخت و رفتار تغییرات توان خروجی بدون کنترل نوسانات را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۱ توان خروجی راکتور با سیستم کنترلی پیشنهادی به ترسیم در آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نوسانات توان خروجی در صورت نبود کنترل جریان ۲۰ درصد است. پیشرفت چشمگیر در شکل ۱۱ در ردیابی توان هسته موردنظر و افزایش توانایی در کاهش ریبیل برای راکتور مجهز به درایو موردبررسی توسط حلقه کنترل گشتاور داخلی مشاهده می‌شود. توان موردنظر به‌سرعت و بدون برانگیختگی و نوسان به‌دست می‌آید. علاوه بر این، تغییر در دمای سوخت، سرعت میله کنترل و اکتیویته حالت پایدار و قابل قبولی دارند. در شکل (۸)، پس از یک نوسان قابل قبول، تغییرات سرعت به 10^{-4} رسید که مقدار بسیار ناچیزی هست. علاوه بر این، راکتیویته ورودی هسته در حاشیه اطمینان قرار دارد ($\rho_{ext} < \beta_{eff}$). عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در این مقاله را به‌وضوح در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان مشاهده کرد که به ترتیب بیانگر تغییرات جریان موتور رلوکتانس سوئیچی در حالت استفاده از الگوریتم‌های فوق و استفاده نکردن از آنها است. تغییرات جریان در حالت بهینه‌شده 5×10^{-4} یا به عبارت دیگر نزدیک به صفر است در حالی که در حالت بهینه‌نشده، نوسانات بیشتر و تغییرات دامنه نزدیک به ۸۰۰۰ برابر حالت استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی دارد که بیانگر ردیابی دقیق مقادیر مرجع و کارکرد درست کنترل‌کننده جریان پیشنهادی است.

جدول ۱. مقادیر بهینه ضراب کنترلی برای موتور رلوکتانسی

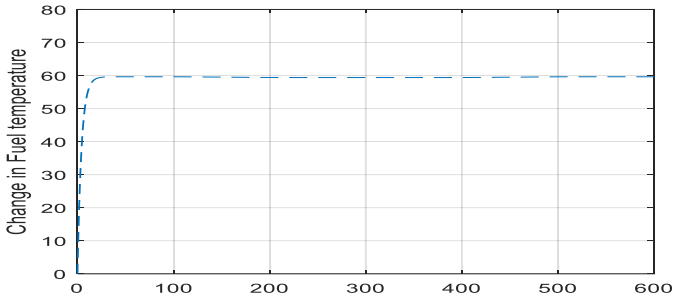
Algorithm	$k_{p,best}$	$k_{i,best}$	$k_{pm,best}$	$k_{im,best}$	$f_{obj,best} (IAE)$	$f_{obj,best} (ISE)$
FA	8×10^{-4}	5×10^{-8}	4.5	6.17	1.71	—
FA	8.3×10^{-4}	5.9×10^{-8}	4.37	6.62	—	1.044
DE	8.6×10^{-4}	4.8×10^{-8}	4.02	6.51	1.64	—
DE	8.5×10^{-4}	4.4×10^{-8}	4.21	6.38	—	1.03



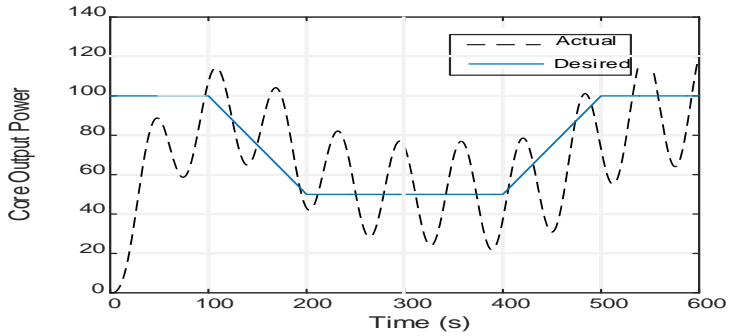
شکل ۷. تغییرات راکتیویته ورودی قلب راکتور



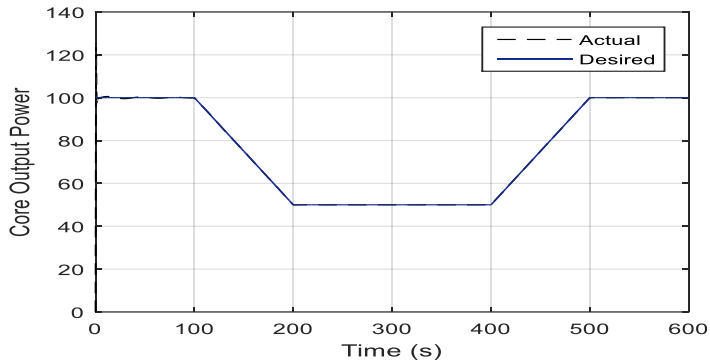
شکل ۸. تغییرات سرعت میله کنترل



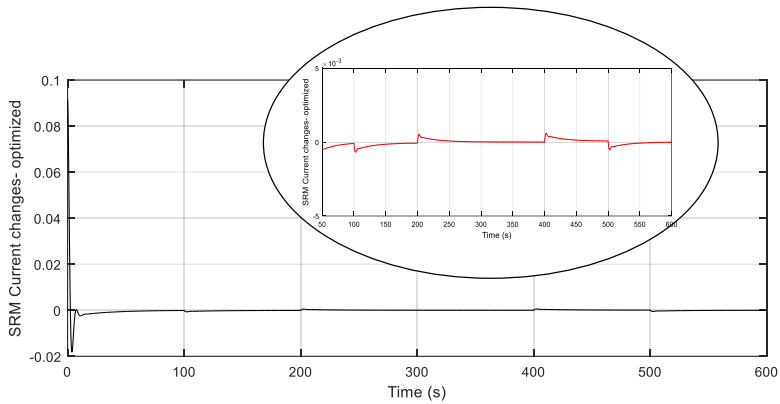
شکل ۹. تغییرات دمای سوخت راکتور



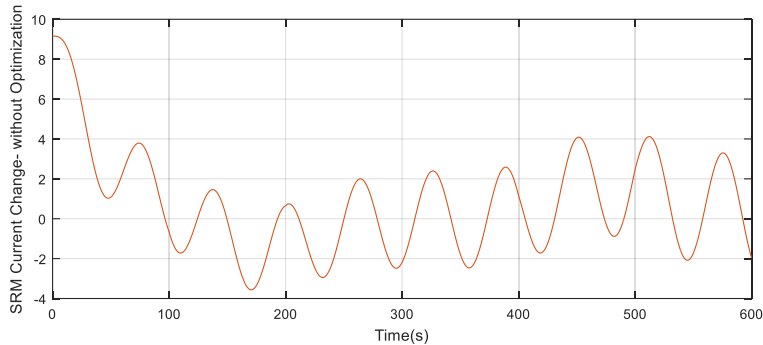
شکل ۱۰. توان خروجی راکتور بدون کنترل ریپل



شکل ۱۱. توان خروجی راکتور با کنترل ریپل

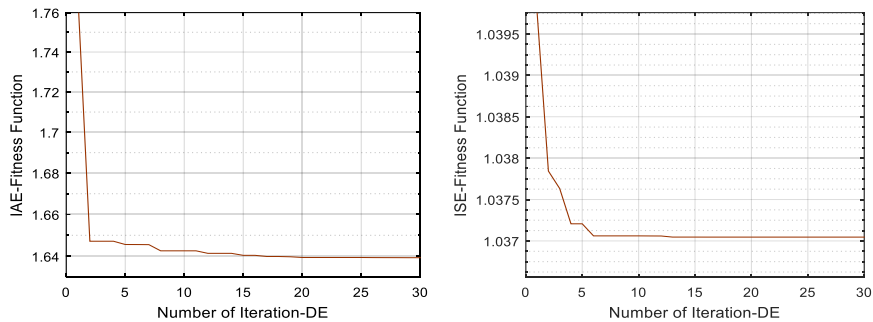


شکل ۱۲. تغییرات جریان موتور رلوکتانسی در حالت بهینه‌سازی

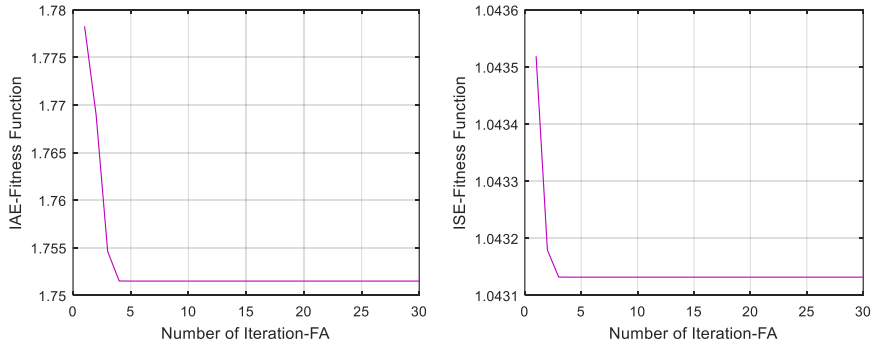


شکل ۱۳. تغییرات جریان موتور رلکتانسی بدون بهینه‌سازی

به‌طور کلی، در مقاله حاضر، از کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی موجود در طرح پیشنهادی، برای حذف نوسانات توان خروجی و ردیابی بهتر آن، استفاده شده است. از سیگنال خطای توان و سیگنال سرعت موتور که توسط سنسورهای موجود گرفته می‌شود، گشتاور و بدین ترتیب جریان محاسبه می‌شود و با جریان مرجع مقایسه می‌گردد و از اختلاف سیگنال به‌دست‌آمده در ساختار کنترلی پیشنهادی، سیگنال‌های آتش مبدل تأمین می‌شود. لذا بازخورد توان راکتور تأثیر مستقیم بر روی مبدل دارد و نوسانات توان را کاهش می‌دهد. در عمل، افزایش یا کاهش جریان از مقادیر مرجع خود باعث تغییر ساختار کلیدزنی مبدل خواهند شد. افزایش جریان از مقدار مرجع خود باعث خاموش شدن یکی از سوئیچ‌های مبدل یا هردو می‌شود و کاهش مقدار آن از مقدار مرجع منجر به کارکرد هر دو سوئیچ خواهد شد. ضرایب کنترل‌کننده‌های ذکر شده توسط دو الگوریتم بهینه‌سازی به‌دست می‌آید.



شکل ۱۴. رفتار الگوریتم تکامل تفاضلی



شکل ۱۵. رفتار الگوریتم کرم شب تاب

نتیجه گیری

در این پژوهش، امکان‌سنجی و جایگزینی موتورهای سوئیچ رلوکتانس برای کاربرد در راکتور هسته‌ای به‌عنوان هدایت‌کننده میله کنترل بررسی شده است. مدل‌سازی راکتور هسته‌ای با موتور رلوکتانس سوئیچی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برای بررسی هم‌گرایی و کشش سیستم موردنظر انجام شد. یک کنترلر PI حلقه بسته ارائه شده است. با استفاده از کنترلر پیشنهادی، در موتورهای رلوکتانس سوئیچی ارائه‌شده، ریبیل و متعاقباً لرزش مشاهده شد. از این رو با کاهش ریبیل‌ها، موتور فوق‌کاندیدای پیشنهادی قلب هسته‌ای است. برای بهبود رفتار ریبیل، کنترل‌کننده جریان استفاده‌شده در مدلی که در آن پارامترهای کنترل به‌صورت آفلاین بر اساس الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و کرم شب تاب بهینه می‌شوند، استفاده شد؛ نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که الگوریتم‌های ذکر شده، در مسائل چند محوره دارای سرعت عملکرد بالاتر، تعداد تکرار پایین، ساختار کدنویسی ساده‌تر و عملکرد موفق می‌باشند. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که استراتژی‌های کنترل پیشنهادی از اهمیت زیادی برای کاهش ریبیل، لرزش و جهش برخوردار هستند. در نهایت، موتور رلوکتانس سوئیچی دارای مزایای اصلی کم‌هزینه بودن، در دسترس بودن، بدون خطر احتراق مجدد و بدون ریبیل است.

Reference

- [1] Boyd, S., Boyd, S. P., Vandenberghe, L., & Press, C. U. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge University Press. <https://books.google.com/books?id=mYm0bLd3fcoC>
- [2] Bilal, Pant, M., Zaheer, H., Garcia-Hernandez, L., & Abraham, A. (2020). Differential Evolution: A review of more than two decades of research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 90, 103479. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103479>
- [3] Ranjini Kizhakkethil, S., & Murugan, S. (2018). Design and performance comparison of permanent magnet brushless motors and switched reluctance motors for extended temperature applications. *Progress In Electromagnetics Research M*, 67, 137-146. <https://doi.org/10.2528/PIERM18022502>
- [4] Andrada, P., Blanqué, B., Martinez, E., & Torrent, M. (2014). A Novel Type of Hybrid Reluctance Motor Drive. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 61(8), 4337-4345. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2279384>

- [5] Lin, C., & Lin, B.-F. (2012). Automatic pressurized water reactor loading pattern design using ant colony algorithms. *Annals of Nuclear Energy*, 43, 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.12.002>
- [6] Ortiz, J. J., Castillo, A., Montes, J. L., & Perusquía, R. (2007). A new system to fuel loading and control rod pattern optimization in boiling water reactors. *Nuclear Science and Engineering*, 157(2), 236-244. <http://repositorio.fcencias.unam.mx:8080/jspui/handle/11154/1090>
- [7] Ahmad, A., & Ahmad, S.-u.-I. (2018). Optimization of fuel loading pattern for a material test reactor using swarm intelligence. *Progress in Nuclear Energy*, 103, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.11.007>
- [8] de Moura Meneses, A. A., Machado, M. D., & Schirru, R. (2009). Particle Swarm Optimization applied to the nuclear reload problem of a Pressurized Water Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 51(2), 319-326. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.07.002>
- [9] Waintraub, M., Schirru, R., & Pereira, C. M. N. A. (2009). Multiprocessor modeling of parallel Particle Swarm Optimization applied to nuclear engineering problems. *Progress in Nuclear Energy*, 51(6), 680-688. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.02.004>
- [10] de Oliveira, I. M. S., & Schirru, R. (2011). Swarm intelligence of artificial bees applied to In-Core Fuel Management Optimization. *Annals of Nuclear Energy*, 38(5), 1039-1045. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.01.009>
- [11] Safarzadeh, O., Zolfaghari, A., Norouzi, A., & Minucmehr, H. (2011). Loading pattern optimization of PWR reactors using Artificial Bee Colony. *Annals of Nuclear Energy*, 38(10), 2218-2226. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.06.008>
- [12] Poursalehi, N., Zolfaghari, A., & Minucmehr, A. (2013). PWR loading pattern optimization using Harmony Search algorithm. *Annals of Nuclear Energy*, 53, 288-298. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.02.004>
- [13] de Moura Meneses, A. A., Araujo, L. M., Nast, F. N., da Silva, P. V., & Schirru, R. (2018). Application of metaheuristics to Loading Pattern Optimization problems based on the IAEA-3D and BIBLIS-2D data. *Annals of Nuclear Energy*, 111, 329-339. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.09.008>
- [14] Poursalehi, N., Zolfaghari, A., Minucmehr, A., & Moghaddam, H. K. (2013). Continuous firefly algorithm applied to PWR core pattern enhancement. *Nuclear Engineering and Design*, 258, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.011>
- [15] Schlünz, E., Bokov, P., & Vuuren, J. (2016). An optimisation-based decision support system framework for multi-objective in-core fuel management of nuclear reactor cores. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(3), 201-209. <https://doi.org/10.7166/27-3-1650>
- [16] Schlünz, E., Bokov, P., & Vuuren, J. (2018). Multiobjective in-core nuclear fuel management optimisation by means of a hyperheuristic. *Swarm and Evolutionary Computation*, 42, 58-76. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.02.019>
- [17] Jayalal, M. L., Murty, S. A. V. S., & Magapu, S. B. (2014). A Survey of Genetic Algorithm Applications in Nuclear Fuel Management. *Journal of Nuclear Engineering and Technology*, 4(1), 45-62. <http://www.stmjournals.com/index.php?journal=JoNET&page=article&op=view&path%5B%5D=4616>
- [18] del Campo, C. M. n., Francois, J., & López, H. (2001). AXIAL: a system for boiling water reactor fuel assembly axial optimization using genetic algorithms. *Annals of*

- Nuclear Energy*, 28(16), 1667-1682. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:33033264
- [19] Martín del Campo, C., Palomera-Pérez, M.-Á., & François, J. (2009). Advanced and flexible genetic algorithms for BWR fuel loading pattern optimization. *Annals of Nuclear Energy* 36(10), 1553-1559. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.07.013>
- [20] Ortiz, J. J., & Requena, I. (2004). An Order Coding Genetic Algorithm to Optimize Fuel Reloads in a Nuclear Boiling Water Reactor. *Nuclear Science and Engineering*, 146(1), 88-98. <https://doi.org/10.13182/NSE04-A2395>
- [21] Do, B., Choi, H., & Roh, G. (2006). An Evolutionary Optimization of the Refueling Simulation for a CANDU Reactor. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 53(5), 2957-2961. <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.882369>
- [22] Huo, X., & Xie, Z. (2005). A novel channel selection method for CANDU refueling based on the BPANN and GA techniques. *Annals of Nuclear Energy* 32(10), 1081-1099. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2005.03.003>
- [23] Mishra, S., Modak, R. S., & Ganesan, S. (2009). Optimization of Thorium loading in fresh core of Indian PHWR by evolutionary algorithms. *Annals of Nuclear Energy*, 36(7), 948-955. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.03.003>
- [24] Zarei, M. (2019). An optimization based output power regulation in small modular reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 344, 144-152. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.01.032>
- [25] Pratapgiri, S., & Prasad, P. V. N. (2011). Direct Instantaneous torque control of 4 phase 8/6 switched reluctance motor. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 1(2), 121-128. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v1i2.102>
- [26] Le-Huy, H., & Chakir, M. (2010, September 6-8). Optimizing the performance of a switched reluctance generator by simulation. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, Italy. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5608165>
- [27] Zhu, Y., Zhao, C., Zhang, J., & Gong, Z. (2020). Vibration Control for Electric Vehicles With In-Wheel Switched Reluctance Motor Drive System. *IEEE Access*, 8, 7205 - 7216. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964582>
- [28] Pasquesoone, G. (2011). *Controls for High Performance Three-Phase Switched Reluctance Motors* [Doctoral Dissertations, University of Akron]. Ohio, United States.
- [29] Bae, H.-K. (2000). *Control of switched reluctance motors considering mutual inductance* [Doctoral Dissertations, Virginia Polytechnic Institute and State University]. <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/28593>
- [30] Lim, H. S., Roberson, D. G., Lobo, N. S., & Krishnan, R. (2005, November 6-10). Novel flux linkage control of switched reluctance motor drives using observer and neural network-based correction methods. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005, Raleigh, NC, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1569115>