

THIẾT KẾ MẪU TÁI NẠP NHIÊN LIỆU VÙNG HOẠT NHẪM CỰC ĐẠI HÓA HỆ SỐ NHÂN HIỆU DỤNG CỦA Lò PHẢN ỨNG HẠT NHÂN BẰNG THUẬT TOÁN DI TRUYỀN

IN-CORE REFUELING OPTIMIZATION FOR A NUCLEAR REACTOR

Đỗ Quang Bình,
ĐH Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu giải bài toán tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu cho lò phản ứng hạt nhân loại nghiên cứu. Mục tiêu của bài toán tối ưu là cực đại hóa thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} với các ràng buộc là những tham số an toàn của lò phản ứng. Phương pháp giải bài toán tối ưu được dùng trong nghiên cứu này là thuật toán di truyền kết hợp với chiến lược gìn giữ các phần tử ưu tú. Thuật toán di truyền hoạt động trên các quần thể nhiễm sắc thể dạng một chuỗi số nguyên. Nghiên cứu được tiến hành để tìm kiếm cấu hình nạp tải nhiên liệu tối ưu cho chu trình vận hành thứ hai đối với một lò phản ứng nghiên cứu loại TRIGA MARK II. Tính toán toàn lò được thực hiện bằng chương trình máy tính phân tích lò phản ứng hạt nhân CITATION.

Từ khóa: Lò phản ứng hạt nhân, Tính toán toàn lò, Tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu, Mẫu tái nạp nhiên liệu vùng hoạt, Thuật toán di truyền, Chiến lược gìn giữ các phần tử ưu tú.

ABSTRACT

This paper presents results from the problem of in-core refueling optimization for a nuclear research reactor. The aim of the optimization problem is to maximize the effective multiplication factor while satisfying the safety-related neutron parameters of the reactor. A genetic algorithm combined with the elitism strategy is used to solve the problem. The genetic algorithm works on the populations of chromosomes which are one-dimensional integer chromosomes. An investigation is performed for a nuclear research reactor type TRIGA MARK II to search for the optimal fuel loading patterns for its second operational cycle. Global reactor calculation is carried out using the nuclear reactor core analysis code CITATION.

Keywords: Nuclear reactor, Reactor calculation, Refueling optimization, Refueling pattern, Genetic algorithm, Elitism strategy.

1. GIỚI THIỆU

Nhiên liệu của lò phản ứng hạt nhân bị đốt cháy liên tục trong quá trình hoạt động, vì vậy sau một thời gian vận hành lượng nhiên liệu cần thiết để lò phản ứng (LPU) hoạt động theo yêu cầu của người sử dụng không còn đủ; do đó, LPU cần phải được thay thế nhiên liệu. Tuy nhiên, do phân bố cháy nhiên liệu trong vùng hoạt LPU là không đều nên chỉ thay thế một số bó nhiên liệu (BNL) có độ cháy nhiều nhất, một số BNL cháy ít nên được giữ lại trong LPU cho đến khi độ cháy của chúng đủ lớn. Ở cuối mỗi chu trình làm việc của LPU, người quản lý phải quyết định loại bỏ bao nhiêu BNL và BNL nào bị loại bỏ. Quyết định như vậy cần phải được đưa ra trên cơ sở giải bài toán thay đảo nhiên liệu cho LPU.

Công trình này khảo sát lời giải của bài toán tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu cho LPU hạt nhân nhằm tìm kiếm mẫu tái nạp nhiên liệu vùng hoạt tối ưu cực đại hóa thừa số nhân hiệu dụng của LPU để kéo dài thời gian vận hành của một chu trình. Ở đây phương pháp giải bài toán tối ưu là thuật toán di truyền [1, 2] (Genetic Algorithm viết tắt là GA) kết hợp với chiến lược gìn giữ các phần tử ưu tú [3, 4] (Elitism Strategy viết tắt là ES). Tính toán toàn lò để xác định các đặc trưng vật lý neutron của LPU được thực hiện bằng chương trình CITATION [5]. Kết quả tính toán để tìm lời giải tối ưu cho chu trình vận hành thứ hai của một LPU nghiên cứu (LPU hạt nhân Đà Lạt) sẽ được trình bày trong bài báo này.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN THAY ĐẢO NHIÊN LIỆU LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

Bài toán tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu LPU trong nghiên cứu này được thiết lập như sau: tìm kiếm cấu hình vùng hoạt tối ưu cho chu trình vận hành tiếp theo của LPU nhằm cực đại hóa hệ số nhân hiệu dụng đồng thời phải thỏa mãn các yêu cầu an toàn vận hành LPU. Hàm mục tiêu là thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} :

$$F(x) = k_{eff} \quad (1)$$

Biến quyết định x trong bài toán là cấu hình vùng hoạt LPU. Các giới hạn của bài toán là các đặc trưng vật lý và an toàn LPU như thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} , hệ số bất đồng đều công suất PPF, độ cháy nhiên liệu BU:

Thừa số nhân hiệu dụng:

$$k_{min} \leq k_{eff} \leq k_{max} \quad (2)$$

Hệ số bất đồng đều công suất:

$$PPF \leq PPF_{max} \quad (3)$$

Độ cháy: $BU \leq BU_{max}$ (4)

với k_{min} và k_{max} là giới hạn cực tiểu và cực đại của k_{eff} , PPF_{max} là giá trị cực đại của PPF, BU_{max} là độ cháy cực đại của các BNL còn được giữ lại trong vùng hoạt.

3. THUẬT TOÁN DI TRUYỀN VÀ TÍNH TOÁN TOÀN LÒ

GA thực hiện việc tìm kiếm lời giải tối ưu trên cơ sở khảo sát một quần thể các lời giải từ thế hệ này sang thế hệ khác cho đến khi thỏa mãn các điều kiện tối ưu. Các thành phần chính yếu của GA gồm có:

Toán tử chọn lọc (Selection) chọn các cá thể tốt để làm cha mẹ cho quá trình tái sinh tạo nên thế hệ mới trên cơ sở độ thích nghi (Fitness) của từng cá thể trong quần thể hiện hành. Trong công trình này quá trình chọn lọc được thực hiện bằng phương pháp quay bánh xe roulette kết hợp với chiến lược gìn giữ các phần tử ưu tú [6]

Toán tử lai tạo (Crossover) thực hiện việc ghép các gene của cha và mẹ để tạo ra các con cho thế hệ mới, các con này thừa hưởng các đặc trưng của cả cha lẫn mẹ. Quá trình lai tạo trong nghiên cứu này được thực hiện theo phương pháp lai một điểm (One-point crossover method) [2].

Toán tử đột biến (Mutation) thực hiện việc gây biến đổi trên một số gene của các nhiễm sắc thể trong quần thể hiện hành để tạo ra các con có các đặc trưng lạ không có trong mã di truyền của cả cha lẫn mẹ. Quá trình đột biến giúp duy trì tính đa dạng của quần thể, ngăn cản quá trình tìm kiếm hội tụ sớm tới một lời giải tối ưu địa phương. Đột biến trong công trình này được thực hiện theo phương pháp đảo cặp hai gene ngẫu nhiên của một chromosome [6].

Để các toán tử của GA vận hành, biến quyết định của bài toán thay đảo nhiên liệu là cấu hình nạp tải nhiên liệu vùng hoạt cần phải được mã hóa thành nhiễm sắc thể dạng một chuỗi số nguyên có giá trị từ 1 đến N , với N là tổng số BNL có trong một cấu hình vùng hoạt LPU [7]. Độ dài của mỗi nhiễm sắc thể bằng N . Ví dụ một nhiễm sắc thể tương ứng với một cấu hình vùng hoạt gồm 100 BNL là chuỗi số (1 2 3... 98 99 100).

Bởi vì GA dựa trên quá trình ngẫu nhiên nên các cá thể tốt nhất trong một thế hệ có thể không được chọn cho thế hệ tiếp theo; hơn nữa, cá thể tốt nhất trong thế hệ sau chưa hẳn tốt hơn cá thể tốt nhất trong thế hệ trước. Để bảo toàn các cá thể tốt nhất phát hiện được trong quá trình tìm kiếm, các cá thể xấu nhất trong một thế hệ phải nên được thay bởi các cá thể tốt hơn được tìm thấy trong các thế hệ trước đó. Như vậy, cá thể tốt nhất trong thế hệ cuối cùng luôn luôn là cá thể tốt nhất trong suốt quá trình tìm kiếm. Hướng dẫn quá trình tìm kiếm của GA theo cách như vậy được gọi là chiến lược gìn giữ các phần tử ưu tú. Biện pháp để thực hiện ES là tạo nên một kho lưu trữ (Archive). Kho lưu trữ lưu chứa các lời giải tốt nhất trong quá trình tìm kiếm. Để thi hành ES cần phải áp dụng một thủ tục chọn lọc cải biên (elitist selection procedure): mỗi thành viên của archive sẽ được chọn một lần cho thế hệ tiếp theo [6].

Để xác định hàm mục tiêu và các đại lượng vật lý và an toàn của LPU như hệ số nhân hiệu dụng k_{eff} và hệ số bất đồng đều công suất PPF và các thông số khác như độ cháy nhiên liệu cần phải thực hiện các tính toán tĩnh học và động học LPU. Trong nghiên cứu này, chương trình CITATION được sử dụng để thực hiện nhiệm vụ tính toán toàn lò bằng việc giải hệ phương trình khuếch tán neutron nhiều nhóm [5]:

$$-D_{r,g}\Delta\Phi_{r,g} + (\Sigma_{a,r,g} + \sum_{g'}\Sigma_{s,r,g\rightarrow g'})\Phi_{r,g} = \sum_{g'}(\Sigma_{s,r,g'\rightarrow g} + \frac{\chi_g(v\Sigma)_{f,r,g'}}{k_{eff}})\Phi_{r,g'} \quad (5)$$

Trong đó, Δ - toán tử Laplace hình học, $\phi_{r,g}$ - thông lượng neutron tại vị trí r và nhóm năng lượng g , $\Sigma_{a,r,g}$ - tiết diện hấp thụ vĩ mô, $\Sigma_{s,r,g\rightarrow g'}$ - tiết diện tán xạ vĩ mô của neutron từ nhóm năng lượng g đến nhóm năng lượng g' , $D_{r,g}$ - hệ số khuếch tán, $v\Sigma_{f,r,g}$ - tiết diện vĩ mô sinh neutron, χ_g - hàm phân bố neutron phân hạch.

Hệ số bất đồng đều công suất PPF được xác định dựa trên phân bố thông lượng neutron và phân bố cháy nhiên liệu của LPU. Mỗi một tính toán toàn lò bằng chương trình CITATION sẽ cung cấp đầy đủ các thông số vật lý neutron cần thiết cho tính toán tối ưu.

Quá trình tìm kiếm lời giải tối ưu trong công trình này được thực hiện theo các bước như sau:

1. Khởi tạo ngẫu nhiên quần thể ban đầu.
2. Giải mã các nhiễm sắc thể thành các mẫu nạp tải nhiên liệu.
3. Thực hiện tính toán toàn lò để xác định các đặc trưng và đánh giá hàm thích nghi của từng cá thể trong quần thể hiện hành.
4. Kiểm tra tiêu chuẩn dừng tìm kiếm. Nếu thỏa mãn thì thực hiện bước 12, nếu không thì tiếp tục bước sau.
5. Chọn các cá thể không bị trội trong quần thể hiện hành đưa vào và làm mới kho lưu trữ.
6. Thực hiện toán tử chọn lọc để chọn các cá thể trong quần thể hiện hành đưa vào bể sinh sản.
7. Chọn ngẫu nhiên một cặp cha mẹ từ bể sinh sản.
8. Thực hiện lai tạo hai cha mẹ tạo ra hai con.
9. Tiếp tục cho đến khi tạo ra đủ số con cho quần thể mới.
10. Thực hiện toán tử đột biến trên các con.

11. Quay trở về bước 2.

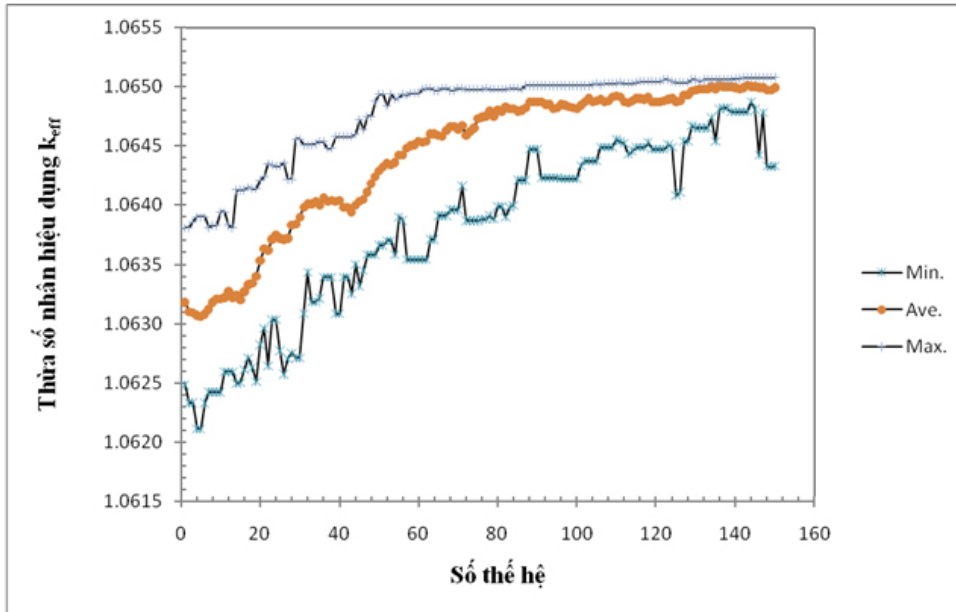
12. Kết thúc quá trình tìm kiếm.

4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN VÀ THẢO LUẬN

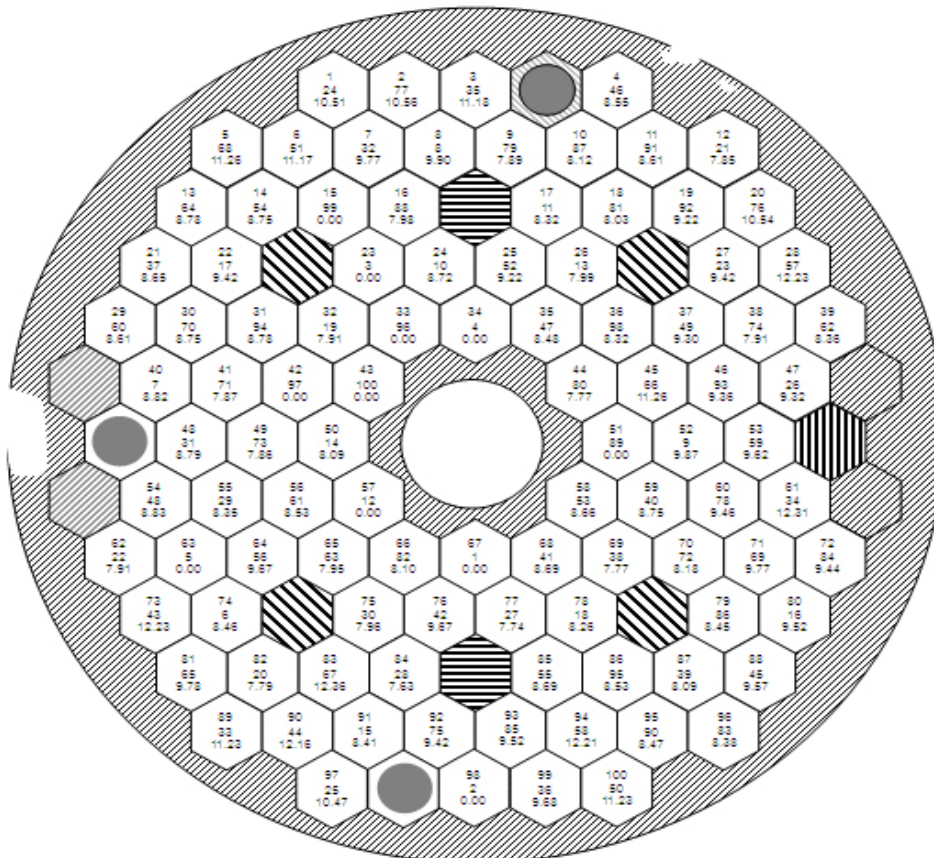
Tính toán khảo sát được thực hiện để tìm sơ đồ thay đảo nhiên liệu tối ưu cho LPU hạt nhân Đà Lạt đối với chu trình vận hành thứ hai. Lúc đó, vùng hoạt lò Đà Lạt có 89 BNL đã cháy được giữ nguyên vị trí, 11 thanh beryli ở ngoại vi được thay bằng 11 BNL mới, tạo nên một cấu hình vùng hoạt gồm 100 BNL [7].

Tính toán tìm kiếm tối ưu được thực hiện qua 150 thế hệ, mỗi quần thể gồm có 50 cá thể. Archive gồm 12 mẫu nạp tải nhiên liệu tốt nhất được lưu chứa trong quá trình tìm kiếm. Xác suất lai $p_c = 0.6$, xác suất đột biến $p_m = 0.01$.

Kết quả tính toán đối với thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} và hệ số bất đồng đều công suất PPF đối với quần thể được trình bày trên bảng 1. Hình 1 biểu diễn sự thay đổi của hàm mục tiêu theo thế hệ tính toán. Có thể nhận thấy rằng thừa số nhân hiệu dụng của các quần thể lời giải tăng liên tục theo số thế hệ. Điều này có nghĩa là quá trình tìm kiếm tiến triển theo chiều hướng cực đại hoá thừa số nhân hiệu dụng. Trên hình 2 là lời giải tốt nhất trong quá trình tìm kiếm được lưu chứa trong archive. Mẫu nạp tải nhiên liệu này có thừa số nhân hiệu dụng $k_{eff} = 1,06508$ và hệ số bất đồng đều công suất $PPF = 1,345$, tốt hơn so với các mẫu nạp tải tạo ra một cách ngẫu nhiên trong thế hệ đầu tiên; so với cấu hình vùng hoạt thay nhiên liệu thực tế ($k_{eff} = 1,060405$ và $PPF = 1,374$) có độ phản ứng dự trữ tăng một lượng $\Delta\rho_{ex} = 0,47\%$ và hệ số bất đồng đều công suất giảm một lượng $\Delta PPF = 0.029$.



Hình 1. Biến đổi của hàm mục tiêu k_{eff} theo số thế hệ trong quá trình tìm kiếm tối ưu.



Hình 2. Cấu hình vùng hoạt có k_{eff} lớn nhất tìm được sau 150 thế hệ cho LPU Đà Lạt tại đầu chu trình vận hành thứ hai.

XXX
YYY
ZZZ

XXX: số hiệu chỉ vị trí trong vùng hoạt LPU,
 YYY: số hiệu BNL
 ZZZ: độ cháy của BNL YYY (Đơn vị %)

Bảng 1. Giá trị của hàm mục tiêu k_{eff} trong quá trình tìm kiếm.

Số thế hệ	k_{eff}			Số thế hệ	k_{eff}		
	Min.	Aver.	Max.		Min.	Aver.	Max.
1	1.06248	1.06318	1.06381	80	1.06419	1.0648	1.06501
10	1.06242	1.06321	1.06394	90	1.06418	1.06474	1.06501
20	1.06282	1.06353	1.06421	100	1.06422	1.06481	1.06501
30	1.06271	1.0639	1.06456	110	1.06455	1.06492	1.06503
40	1.06308	1.06404	1.06458	120	1.06447	1.06487	1.06505
50	1.06366	1.06429	1.06494	130	1.06465	1.06497	1.06506
60	1.06354	1.06454	1.06495	140	1.06479	1.06499	1.06507
70	1.06396	1.06464	1.06499	150	1.06433	1.06499	1.06508

5. KẾT LUẬN

Từ các kết quả tính toán trình bày ở trên có thể kết luận: GA kết hợp với ES đã hoạt động tốt để tìm kiếm lời giải cho bài toán tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu cho LPU hạt nhân nhằm tìm kiếm mẫu tải nạp nhiên liệu cực đại hóa hệ số nhân hiệu dụng tại đầu một chu trình vận hành. Quá trình tìm kiếm liên tục làm tăng thừa số nhân hiệu dụng của các quần thể lời giải theo số thế hệ. Các mẫu nạp tải nhiên liệu được lưu giữ trong kho lưu trữ thể hiện nhiều ưu điểm so với cấu hình nạp tải thực tế và có thể được người quản lý LPU chọn cho ứng dụng thực tế khi phân tích chúng ở các khía cạnh khác nhau theo quan điểm riêng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [2] D.F. Goldberg, *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1989.
- [3] S.M. Yang, D.G. Shao, Y.J. Luo, “A novel evolution strategy for multiobjective optimization problem,” *Appl. Math. Comput.*, 170, 2005, 850–873.
- [4] A. Yamamoto, “A quantitative comparison of loading pattern optimization methods for in-core fuel management of PWR,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, 34, 1997, 339–347.
- [5] T.B. Fowler, D.R. Vondy, F.B. Kemshell, Nuclear reactor core analysis code: CITATION, ORNL-TM-2496, RSICC, 1971.
- [6] Q. B. Do and P. L. Nguyen, “Application of a genetic algorithm to the fuel reload optimization for a research reactor”. *Applied Mathematics and Computation*, USA, Vol. 187, 2007, 977-988.
- [7] Đỗ Quang Bình, Nguyễn Hoàng Hải, “Nghiên cứu tối ưu hóa thay đảo nhiên liệu lò phản ứng hạt nhân bằng thuật toán di truyền”, Tuyển tập báo cáo khoa học Hội nghị KH-CNHN lần VIII Nha Trang-2009.