

Mô hình hỗ trợ ra quyết định đầu tư trong các dự án xây dựng nhà máy năng lượng tái tạo

Phạm Vũ Hồng Sơn^{1, 2}, Nguyễn Thanh Huy^{2, 3*}

¹ Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

² Bộ môn Thi công và Quản lý Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM

³ Học viên cao học ngành Quản lý Xây dựng, Bộ môn Thi công và Quản lý Xây dựng, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM

TỪ KHOÁ

Thuật toán ra quyết định đầu tư
 Mô hình mô phỏng dựa trên đại lý
 Lập kế hoạch mở rộng công suất
 Mô hình tối ưu hóa

TÓM TẮT

Việc đầu tư phát triển nhanh về Năng Lượng Tái Tạo (NLTT) cũng như việc áp dụng đề án phát triển thị trường bán lẻ điện cạnh tranh luôn là thách thức lớn đối với các nhà đầu tư. Sự không chắc chắn về giá bán điện dẫn đến nhiều rủi ro trong việc hoạch định doanh thu và lợi nhuận khi quyết định đầu tư một nhà máy mới. Nghiên cứu này nhằm mục đích phân tích các phương pháp dự báo giá khác nhau được áp dụng trong các mô hình mô phỏng hệ thống điện dựa trên dữ liệu của các đại lý hiện có. Từ đó đưa ra phương pháp dự báo giá dựa trên mô hình tối ưu hóa và hỗ trợ ra nhà đầu tư ra quyết định. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, trong một thị trường điện cô lập với các thiết lập mô hình được cách điệu hóa cao, các quyết định đầu tư được thực hiện bởi các thuật toán đầu tư hiện có rất nhạy cảm với các giả định liên quan đến các tham số nhất định của thuật toán ra quyết định đầu tư. Việc áp dụng mô hình dựa trên đại lý này giúp các nhà đầu tư giảm thiểu các rủi ro tiềm ẩn và hướng tới một thị trường cạnh tranh minh bạch trong tương lai, phù hợp với thị trường bán lẻ điện cạnh tranh mà Việt Nam đang hướng tới.

KEYWORDS

Agent-based simulation modeling
 Generation expansion planning
 Optimization modeling

ABSTRACT

The investment to encourage rapid development of Renewable Energy (RE) as well as the application of the development scheme of competitive electricity retail market is always considered to be a great challenge for investors. The uncertainty of electricity selling price results in many risks for revenue and profit planning when making decision on new plant investment. This study aims to analyze various price forecasting methods applied in power system simulation models based on data from existing agents. From there, a price forecasting method is proposed based on the optimization model and supports investors in decision making. The simulation result shows that, in an isolated electricity market with highly stylized model settings, investment decisions made by existing investment algorithms are very sensitive to assumptions related to certain parameters of the investment decision – making algorithm. The application of such agent-based model helps investors reduce potential risks and move towards a transparent competitive market in the future, in line with the competitive electricity retail market towards which Vietnam is moving.

1. Giới thiệu

Với mức độ phức tạp của hệ thống điện thì Mô hình dựa trên đại lý (Agent-Based Model - ABM) là một trong những mô hình được thường xuyên sử dụng. Thuật toán ra quyết định đầu tư trong mô hình dựa trên đại lý dài hạn thường bao gồm ba bước. Đầu tiên, các dự báo được đưa ra liên quan đến lợi nhuận có thể thu được cho các

khoản đầu tư tiềm năng. Thứ hai, những dự báo này được sử dụng để đánh giá khả năng sinh lời của các khoản đầu tư tiềm năng. Khả năng sinh lời thường được thể hiện bằng cách tính toán các số liệu phổ biến, chẳng hạn như giá trị hiện tại ròng (NPV) hoặc tỷ suất hoàn vốn nội bộ (IRR). Trong bước thứ ba và cuối cùng, khoản đầu tư có lợi nhất, nếu có, sẽ được chọn. Quá trình này thường được lặp lại cho đến khi không có đại lý nào sẵn sàng đầu tư nữa. Thách thức

*Liên hệ tác giả: nguyenthanhhuycmut@gmail.com

Nhận ngày 15/10/2021, sửa xong ngày 04/11/2021, chấp nhận đăng 05/06/2022

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2022.358>

chính mà các mô hình này phải đối mặt nằm ở bước đầu tiên, tức là thiết kế một phương pháp phù hợp cho phép các đại lý đưa ra dự đoán về các dòng doanh thu trong tương lai. Trong khi các mô hình dựa trên đại lý hiện tại được điều chỉnh dựa trên các chỉ số và tiêu chí được sử dụng để đưa ra quyết định đầu tư (ví dụ: NPV không âm hoặc IRR tối thiểu), các phương pháp được sử dụng trong các mô hình dựa trên đại lý dài hạn hiện có khác nhau để dự đoán giá trong tương lai hoặc các luồng doanh thu thay đổi mạnh mẽ.

2. Giới thiệu về mô hình dựa trên đại lý

Trong những thập kỷ qua, mô hình dựa trên đại lý đã được sử dụng để trả lời nhiều loại câu hỏi nghiên cứu trong bối cảnh hệ thống điện. Nhìn chung, có thể xác định hai nhóm mô hình dựa trên đại lý: mô hình dựa trên đại lý ngắn hạn và mô hình dựa trên đại lý dài hạn. Hai loại mô hình dựa trên đại lý này thường được sử dụng cho các

mục đích khác nhau và trọng tâm của bài là về mô hình dựa trên đại lý dài hạn. Các mô hình dựa trên đại lý ngắn hạn chủ yếu được sử dụng để nghiên cứu trò chơi đấu thầu trên một thị trường theo các thiết kế thị trường khác nhau. Đánh giá toàn diện về các mô hình dựa trên đại lý ngắn hạn có thể được tìm thấy trong tham khảo [1], [2]. Không giống như các mô hình dựa trên đại lý ngắn hạn tập trung vào kết quả của thị trường giao ngay, các mô hình dựa trên đại lý dài hạn được phát triển để nghiên cứu quá trình chuyển đổi hệ thống điện với quy mô thời gian thay đổi từ nhiều năm đến nhiều thập kỷ. Một số mô hình dựa trên đại lý dài hạn đã kết hợp việc ra quyết định đầu tư ở cấp đại lý, ví dụ PowerACE [3], [4], AMIRIS [5], EMCAS [6], [7] và EMLab [8] – [10]. Mỗi mô hình kể trên đều phát triển phương pháp dự báo giá khác nhau và ở nghiên cứu này sẽ tập trung xem xét ảnh hưởng của các phương pháp dự báo giá này đến kết quả mô phỏng, cũng như xây dựng một phương pháp dự báo giá mới minh bạch hơn, khả thi khi ứng dụng vào mô hình mô phỏng hệ thống điện bán lẻ cạnh tranh của Việt Nam đang hướng tới.

3. Mô phỏng thị trường điện bằng mô hình dựa trên đại lý

3.1. Xây dựng mô hình

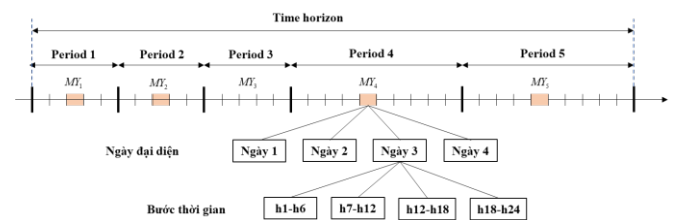
Để đánh giá hiệu quả ảnh hưởng của các phương pháp dự báo giá đến kết quả mô phỏng, một khung mô hình dựa trên đại lý dài hạn được phát triển và các phương pháp dự báo giá khác nhau được triển khai trong thuật toán ra quyết định đầu tư của nó, đồng thời giữ cho tất cả các cài đặt khác trong mô hình không đổi. Sử dụng tập hợp các giả định này cho phép thu được một điểm chuẩn được xác định rõ ràng, điểm cân bằng dài hạn đóng vai trò là một giải pháp tham chiếu. Cụ thể hơn, theo tập hợp các giả định này, mô hình dựa trên đại lý nên hội tụ về trạng thái cân bằng dài hạn. Sự sai lệch so với trạng thái cân bằng dài hạn này có thể được hiểu là tác động của

phương pháp dự báo giá được sử dụng. Mô hình dựa trên đại lý được thực hiện bằng ngôn ngữ lập trình Julia. Mô tả của mô hình dựa trên đại lý dài hạn tuân theo giao thức ODD (Tổng quan, khái niệm thiết kế và chi tiết) như đề xuất của Grimm và cộng sự [11].

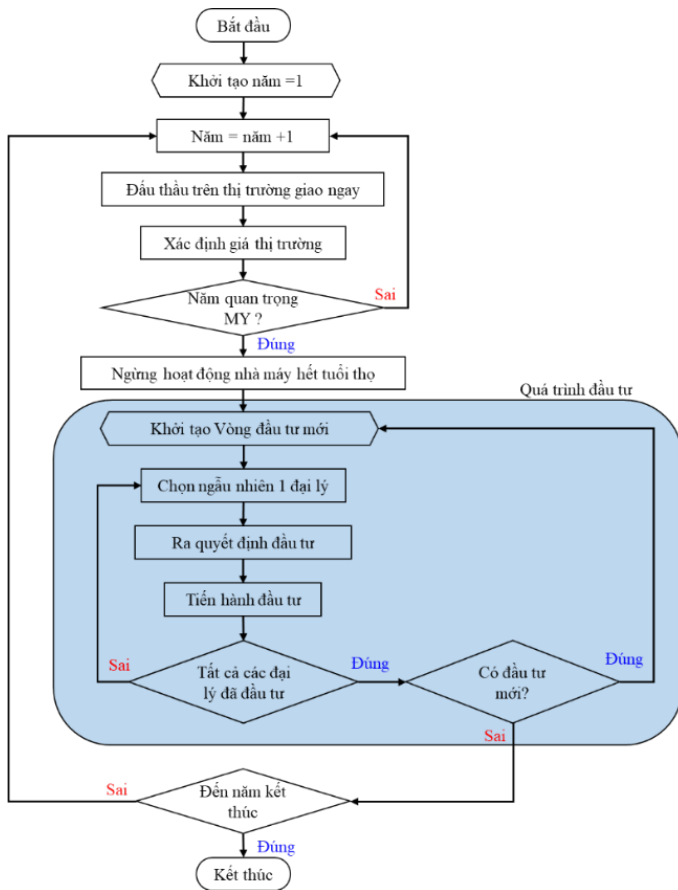
Ba loại đại lý (thực thể) được xem xét trong mô hình dựa trên đại lý dài hạn: các công ty phát điện, nhà điều hành thị trường (Trung tâm Điều độ Hệ thống điện Quốc gia) và người tiêu dùng điện. Đặc điểm chính của đại lý công ty phát điện là danh mục công nghệ của nó. Biện trạng thái của nhà điều hành thị trường là giá điện thị trường. Người tiêu dùng được đặc trưng bởi cấu hình tài của họ.

Là một mô hình dài hạn, mô phỏng bao gồm vài thập kỷ trong khi độ phân giải thời gian là 1 giờ. Do đó, hai khái niệm chính được đưa ra để kết hợp giữa lập kế hoạch dài hạn (với thời gian kéo dài hàng thập kỷ) với hoạt động ngắn hạn (với độ phân giải theo giờ) là: ngày đại diện (representative day) và năm quan trọng (milestone years - MYs). Hình 1 cho thấy một sơ đồ ví dụ về những ngày đại diện và những năm quan trọng. Một cách trực quan, các ngày đại diện tìm cách giảm số ngày thực tế trong một năm bằng cách tìm một số ngày nhất định và trọng số tương ứng của chúng để giảm thiểu độ lệch so với các cấu hình tài theo giờ đầy đủ.

Như được chỉ ra bởi các hình chữ nhật trong Hình 2, bốn quy trình chính được thực hiện trong mô hình dựa trên đại lý dài hạn được đề xuất: đấu thầu trên thị trường giao ngay, xác định giá thị trường, xác định các máy phát điện sẽ ngừng hoạt động và tiến hành đầu tư vào công suất mới. Chi tiết như sau: quá trình đấu thầu trên thị trường giao ngay được thực hiện bởi các nhà sản xuất năng lượng và tất cả các nhà phát điện được giả định đặt giá thầu bằng với chi phí cận biên. Sau đó, nhà điều hành thị trường xác định giá thị trường bằng cách tối đa hóa phúc lợi xã hội. Khi đạt đến một năm quan trọng, các công ty phát điện đầu tiên ngừng hoạt động các đơn vị sản xuất đã đạt đến vòng đời của chúng, tiếp theo là một quá trình đầu tư trong đó các công ty phát điện đưa ra quyết định đầu tư một cách tuần tự.



Hình 1. Một ví dụ về biểu diễn thời gian qua các ngày đại diện [12].



Hình 2. Lưu đồ của mô hình dựa trên đại lý dài hạn.

2.1. Thiết kế mô hình

2.1.1. Giai đoạn khởi tạo

a) Khởi tạo cơ cấu nguồn điện hiện có

Mô hình được khởi tạo với sự kết hợp công suất hiện có được phân bổ đồng đều trong hệ thống, tức là các loại công nghệ khác nhau chiếm cùng một lượng thị phần. Việc khởi tạo này nhằm mục đích đi lệch khỏi trạng thái cân bằng dài hạn để đảm bảo rằng việc đạt đến trạng thái cân bằng này không phải là kết quả của cơ cấu nguồn điện ban đầu.

b) Khởi tạo các đại lý là công ty phát điện

Mô hình được khởi tạo với 5 đại lý là các công ty phát điện và cơ cấu nguồn điện hiện có được chỉ định ngẫu nhiên cho các công ty phát điện này. Trong nghiên cứu này, việc khởi tạo các công ty phát điện sẽ không thay đổi kết quả và kết luận vì chúng đồng nhất.

2.1.2. Dữ liệu đầu vào

Trong nghiên cứu này, dữ liệu phụ tải hệ thống điện của Việt Nam của năm 2021 được sử dụng (Dữ liệu phụ tải được lấy từ website www.nldc.evn.vn, với độ phân giải theo giờ). Giá trị của tải

bị mất (VoLL) là 2000 \$ / MWh và lãi suất 5% cũng được sử dụng. Để đơn giản hóa các phân tích, nghiên cứu này chỉ xem xét các công nghệ có tỷ trọng lớn trong cơ cấu nguồn điện, mang tính đại diện, cụ thể là công nghệ chạy tải nền, tải lưng và tải đỉnh. Các công nghệ này tương ứng với nhiệt điện than, nhiệt điện khí (chu trình hỗn hợp) và điện gió (xa bờ) có các đặc điểm kinh tế - kỹ thuật dựa trên dữ liệu năm 2030 trong Cẩm nang công nghệ Việt Nam [48]. Đặc điểm kinh tế - kỹ thuật của các công nghệ này được trình bày trong Bảng 1. Tất cả các chi phí được thể hiện là đô la Mỹ (USD), giá năm 2019.

2.1.3. Mô hình con

Thuật toán mô tả việc đầu tư vào các nhà máy điện mới bao gồm ba bước. Thứ nhất, các điều kiện thị trường liên quan đến hệ thống điện trong tương lai được hình thành bằng cách xem xét sự phát triển của cơ cấu nguồn điện, giá nhiên liệu và dữ liệu phụ tải. Thứ hai, điều kiện thị trường tương lai được sử dụng để dự đoán giá thị trường trong tương lai. Các phương pháp dự báo giá khác nhau được trình bày trong Phần 3.3. Thứ ba, lợi nhuận của mỗi nhà máy điện ứng viên được đánh giá bằng cách tính NPV của nó. Cuối cùng, nhà máy điện có NPV cao nhất được chọn. Việc tính toán NPV có tính đến doanh thu kỳ vọng, chi phí kỳ vọng và hệ số chiết khấu (đại diện cho tỷ suất lợi nhuận kỳ vọng tối thiểu). Công thức tính NPV như sau:

$$NPV_i = \sum_y \left(\frac{1}{(1+y)^y} \times ((-f_{i,y} \times G_{i,y}) + (\sum_d \sum_h W_{y,d} \times \gamma_{i,y,d,h} \times g_{i,y,d,h} \times (p_{y,d,h} - v_{i,y,d,h}))) \right) \quad (1)$$

Trong đó:

r: lãi suất hàng năm

$\gamma_{i,y,d,h}$: các hệ số công suất (capacity factor)

$f_{i,y}$: chi phí cố định không phụ thuộc vào điện sản xuất thực tế $g_{i,y,d,h}$, nó là tổng chi phí đầu tư hàng năm f_i^{CAPEX} và chi phí vận hành và bảo trì cố định (FOM) $f_i^{O\&M}$ của công nghệ tương ứng. Về mặt toán học, chi phí cố định của mỗi đơn vị phát điện đã lắp đặt được tính như trong phương trình :

$$f_{i,y} = f_i^{CAPEX} + f_i^{O\&M}, \forall i \in I, \forall y \in Y \quad (2)$$

Trong đó chi phí đầu tư được tính bằng công thức (3)

$$f_i^{CAPEX} = P_i \times \frac{r \times (1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1}, \forall i \in I \quad (3)$$

Thuật ngữ chi phí biến đổi $v_{i,y,d,h}$ được tính bằng công thức (4), phụ thuộc vào sản lượng điện thực tế và bao gồm chi phí nhiên liệu (cộng với chi phí phát thải và thuế) $v_{i,y,d,h}^{fuel}/\mu_i$ và chi phí vận hành và bảo trì thay đổi (VOM) $v_{i,y,d,h}^{O\&M}$:

$$v_{i,y,d,h} = v_{i,y,d,h}^{O\&M} + \frac{v_{i,y,d,h}^{fuel}}{\mu_i}, \forall i \in I, y \in Y, d \in D, h \in H \quad (4)$$

Các giá định chính làm nền tảng cho cấu trúc mô hình:

- Dữ liệu phụ tải được giả định là không thay đổi và được lặp lại hàng năm.

- Các đặc tính kinh tế kỹ thuật của tất cả các công nghệ được giả định là không đổi trong toàn bộ thời gian mô phỏng.

- Việc lựa chọn và trọng số tương ứng của các ngày đại diện được giả định là không thay đổi trong tương lai.
- Các quyết định đầu tư của đại lý công ty phát điện không bị ràng buộc về ngân sách.

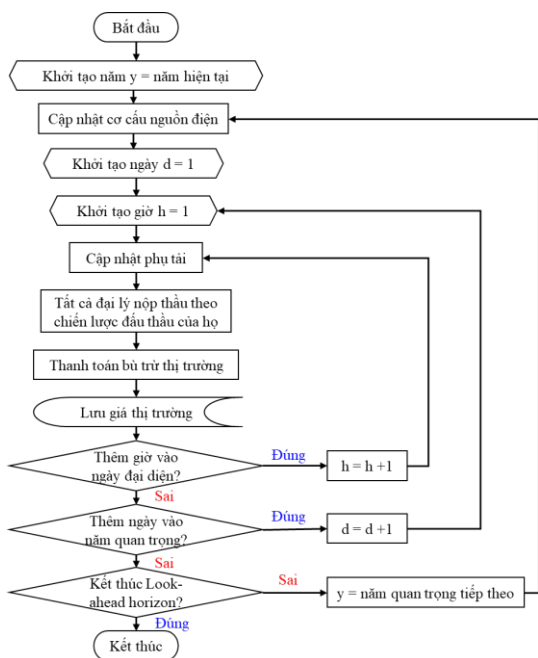
2.2. Các trường hợp nghiên cứu

Trong các mô hình dựa trên đại lý dài hạn hiện có, có thể xác định hai loại phương pháp dự báo giá khác nhau: phương pháp dự báo giá ngoại sinh và phương pháp dự báo giá nội sinh. Mỗi loại có thể được phân biệt thêm bằng hình thức thông tin thiết yếu được cung cấp làm đầu vào cho phương pháp tương ứng. Cả hai loại

Bảng 1. Đặc điểm kinh tế - kỹ thuật của các công nghệ được xem xét.

Công nghệ	Kích thước 1 unit (MW)	Vòng đời (năm)	VOM (\$/MWh)	Giá nhiên liệu (\$/MWh)	Hiệu suất	FOM (\$/kW)	Chi phí đầu tư (\$/kW)
Tài nền (nhiệt điện than)	100	30	0,12	3,55	0,44	59,4	1610
Tài lưỡng (điện gió)	100	30	3,1	0	1	42	2150
Tài đỉnh (nhiệt điện khí CCGT)	100	25	0,13	12,5	0,59	28,5	690

phương pháp dự báo giá hiện có đều dựa vào mô-đun mô phỏng bù trừ thị trường ảo (virtual market clearing simulation module). Mô-đun này xác định các dự báo về giá điện trong tương lai và giờ hoạt động cho các lựa chọn đầu tư khác nhau bằng cách kết hợp các dự báo về cơ cấu nguồn điện trong tương lai với giá nhiên liệu, nhu cầu và thông tin công nghệ. Mặc dù các mô-đun thanh toán bù trừ thị trường ảo được xây dựng và đặt tên khác nhau trong các bài báo được tham khảo, nhưng tất cả chúng đều có thể được hiểu là một thuật toán bù trừ thị trường phù hợp với cung - cầu dựa trên thứ tự tăng dần của giá (merit-order based).



Hình 3. Mô phỏng thanh toán bù trừ thị trường ảo.

Người ta xây dựng một mô-đun mô phỏng thanh toán bù trừ thị trường ảo dựa trên thứ tự tăng dần của giá (merit-order based), được thể hiện trong Hình 3. Trong quá trình mô phỏng thanh toán bù trừ thị trường ảo, thị trường được thanh toán từng bước dựa trên dự báo cơ cấu nguồn điện có từ phương pháp gọi là tầm nhìn tương lai (look-ahead horizon). Tham số tầm nhìn tương lai (look-ahead

horizon) này xác định khoảng cách trong tương lai mà một đại lý có thể tiếp cận thông tin khi một đối tượng đầu tư được đánh giá. Tham số này đã được đặt tên là “khoảng thời gian dự báo (forecast period)” và “đường chân trời thời gian trong năm tham chiếu (reference year time horizon)” tương ứng trong [6], [10]. Ngoài những điểm tương đồng về cách xử lý thông tin trong tương lai, các phương pháp vẫn tồn tại những khác biệt quan trọng về cách dự báo cơ cấu nguồn điện trong tương lai. Sau đây, các phương pháp dự báo giá hiện có sẽ được mô tả chi tiết, đặc biệt chú ý đến thành phần dự báo cơ cấu nguồn điện. Một phương pháp dự báo giá mới (thuộc phương pháp dự báo giá nội sinh) cũng được giới thiệu.

2.2.1. Phương pháp dự báo giá ngoại sinh

Phương pháp dự báo giá ngoại sinh dựa trên thông tin về hệ thống điện trong tương lai từ các nguồn thông tin độc lập với mô hình. Thông tin này thường xuất hiện dưới một trong hai dạng: giá điện trong tương lai hoặc diễn biến của cơ cấu nguồn điện trong tương lai. Dự báo về giá điện trong tương lai có thể được thu thập bằng nhiều cách khác nhau. Ví dụ, giá điện trong tương lai có thể được tính bằng cách ngoại suy giá điện trong quá khứ sử dụng các phương pháp nhận dạng mẫu. Cơ cấu nguồn điện trong tương lai thường được rút ra từ các báo cáo hoặc kết quả nghiên cứu của bên thứ ba. Với thông tin này, các đại lý có thể chạy một mô-đun mô phỏng thanh toán bù trừ thị trường ảo để truy xuất doanh thu dự kiến trong tương lai và giá cận biên.

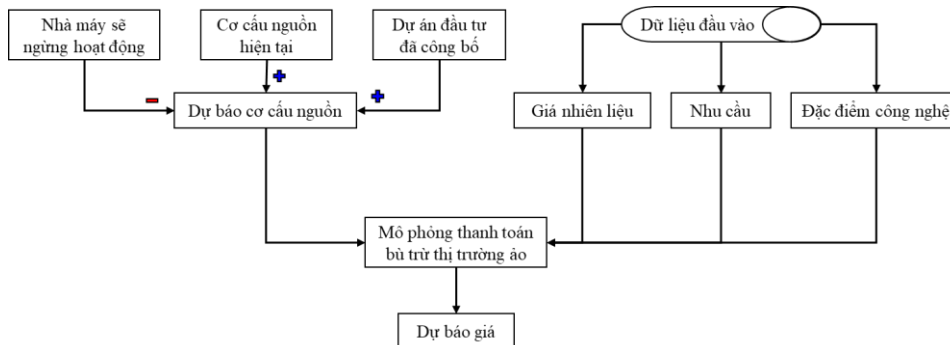
2.2.2. Phương pháp dự báo giá nội sinh

Trong các phương pháp dự báo giá nội sinh, các đại lý dự đoán nội sinh giá tương lai (doanh thu tương ứng và giá cận biên) trong quá trình mô phỏng, tức là người sử dụng không cần cung cấp tất cả thông tin trực tiếp liên quan đến giá điện trong tương lai hoặc sự phát triển cơ cấu nguồn điện trong tương lai. Ví dụ về khung mô hình dựa trên đại lý đã áp dụng các phương pháp dự báo giá nội sinh bao gồm tham khảo [6], [10], [13]. Trong các tài liệu tham khảo này, phương pháp dự báo giá thường bao gồm hai bước. Trong bước đầu tiên, các dự báo được đưa ra liên quan đến cơ cấu nguồn điện trong tương lai. Trong bước thứ hai, dự báo cơ cấu nguồn điện được sử dụng làm đầu vào trong mô-đun mô phỏng thanh toán bù trừ thị trường ảo (Hình 3)

Hình 4 và hình 5 đại diện cho phương pháp dự báo giá nội sinh Endo.2. Ngoài thông tin đã được xem xét bởi phương pháp "đại lý cận cảnh (myopic agents)", phương pháp dự báo giá nội sinh Endo.2 xem xét các dự báo về các khoản đầu tư trong tương lai của các đối thủ cạnh tranh. Tương tự như phương pháp "đại lý cận thị", các dự báo kết quả về cơ cấu nguồn điện trong tương lai sau đó được sử dụng làm đầu vào trong mô-đun mô phỏng bù trừ thị trường ảo để dự đoán giá điện trong tương lai. Đối với việc ra quyết định đầu tư, mô hình được trình bày trong [6] bao gồm những bất ổn liên quan đến tăng trưởng phụ tải, điều kiện thủy văn và các khoản đầu tư của các đối thủ cạnh tranh trong những năm tới. Sự không chắc chắn được biểu diễn thông qua một cây kịch bản, như được thể hiện trong Hình 6. Như được trình bày ở phía bên phải của Hình 6, đối với mỗi đại lý, 9 sự không chắc chắn liên quan đến việc đầu tư của các đối thủ cạnh tranh.

Quyết định mở rộng công suất bao gồm hai lớp: tổng công suất lắp đặt và sự phân bổ công suất này giữa các loại công nghệ khác nhau. Trong lớp đầu tiên, 3 nhánh khác nhau về tổng công suất lắp đặt của các đối thủ cạnh tranh được xem xét, và xác suất được gán cho mỗi nhánh này. Trong lớp thứ hai, mỗi nhánh được chia thành 3 nhánh con khác nhau về sự phân bổ tổng công suất lắp đặt giữa các loại hình công nghệ khác nhau.

Tương tự như các phương pháp dự báo giá ngoại sinh, phương pháp này có những hạn chế rõ ràng nhất định. Hạn chế chính là sự



Hình 4. Sơ đồ phương pháp dự báo giá đại lý cận thị (Myopic agents) [10].

sẵn có của các tham số cho cây kịch bản, dẫn đến mất tính linh hoạt trong việc thiết lập các tình huống cụ thể. Ngoài ra, người ta có thể hiệu chỉnh cây kịch bản khi xem xét lại về cơ cấu nguồn điện trong quá khứ. Cách hiệu chuẩn này có thể ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng bằng cách giả định rằng cơ cấu nguồn điện trong tương lai phát triển theo cách tương tự như trước đây, điều này đã được chứng minh là không phù hợp vì các yếu tố khác nhau như sự xuất hiện của công nghệ mới và các đối thủ kinh doanh mới [14].

2.2.3. Phương pháp dự báo giá dựa trên tối ưu hóa

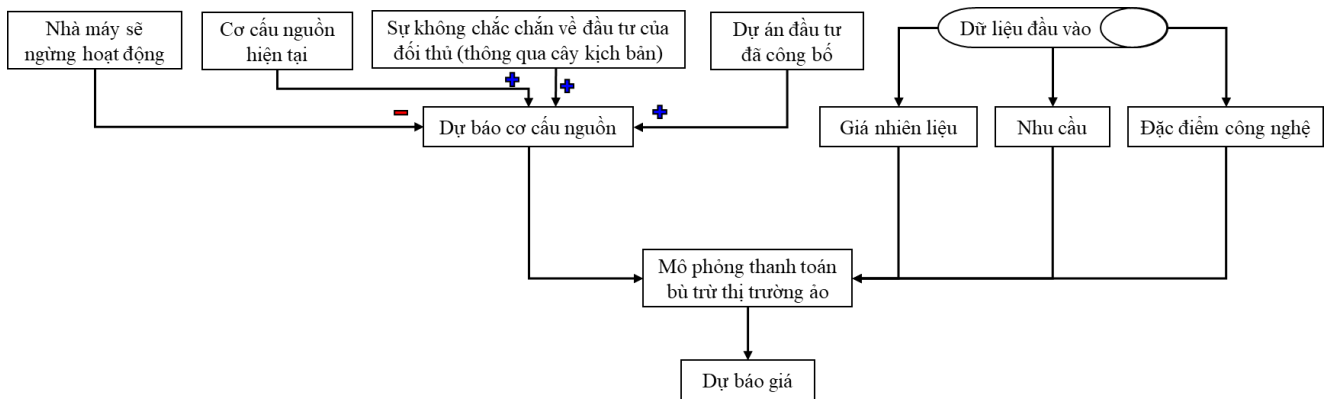
Như được trình bày trong Hình 7, trong phương pháp dự báo giá dựa trên tối ưu hóa mới, các đại lý đưa ra dự báo giá bằng cách giải quyết vấn đề lập kế hoạch mở rộng công suất (tức là mô hình tối ưu hóa hệ thống điện dài hạn truyền thống). Cách giải thích của phương pháp này là mỗi đại lý giả định rằng cơ cấu nguồn điện hệ thống sẽ phát triển theo cách giảm thiểu chi phí khi đưa ra các dự báo giá dài hạn. Vì lý do này, từ đó phương pháp này sẽ được gọi là phương pháp "tối thiểu chi phí đầu tư trong tương lai". Thông tin liên quan đến cơ cấu nguồn điện hiện tại, các khoản đầu tư đã được công bố và các kế hoạch về các nhà máy sẽ ngừng hoạt động trong tương lai được sử dụng làm đầu vào cho bài toán lập kế hoạch mở rộng công suất phát điện. Thông tin đầu ra từ bài toán lập kế hoạch mở rộng công suất này gồm hai phần: giá bóng (shadow price) và dự báo cơ cấu nguồn điện.

2.2.3.1. Hàm mục tiêu

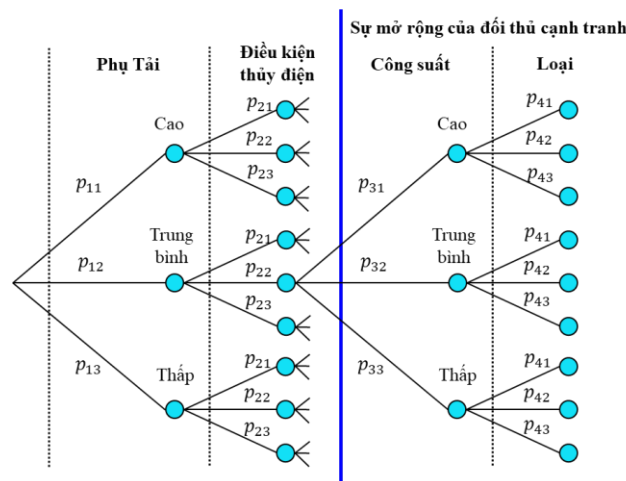
Hàm mục tiêu nhằm mục đích giảm thiểu tổng chi phí hệ thống:

$$\min_{G_{j,y}} \sum_y \sum_j (f_{j,y} \times G_{j,y}) + (\sum_d \sum_h W_d \times v_{j,y,d,h} \times g_{j,y,d,h} \times \Delta t) + ((VoLL \times \sum_y \sum_d (W_d \times \sum_h I_{y,d,h})) \quad (5)$$

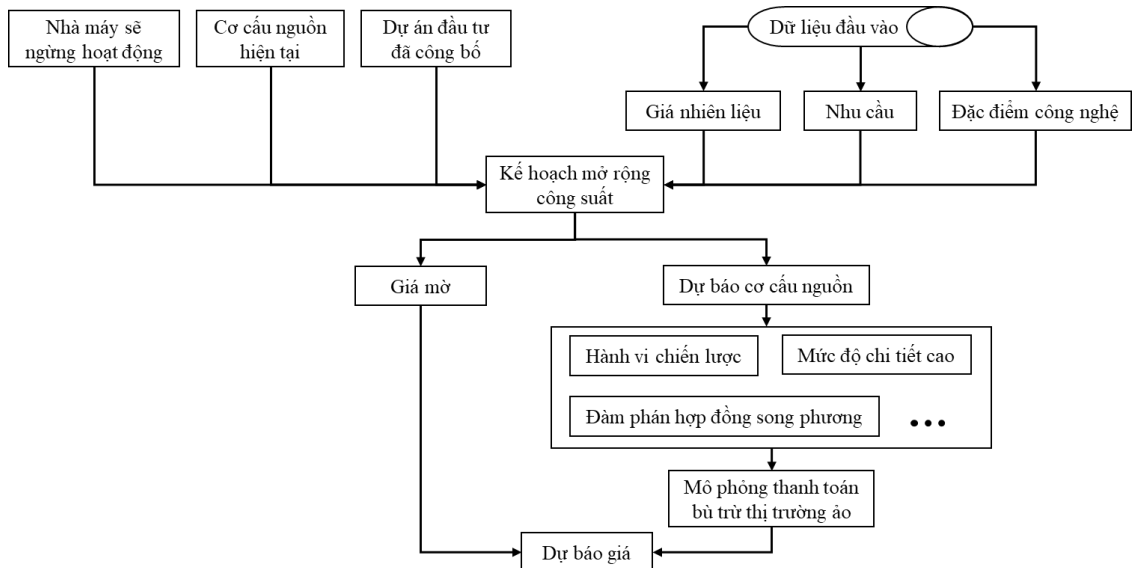
Hai phần trong hàm mục tiêu lần lượt thể hiện chi phí phát điện và chi phí tổn thất điện. Chi phí phát điện bao gồm chi phí cố định (xem phương trình (2)) và chi phí biến đổi (xem phương trình (4)). Chi phí của tổn thất điện là tổng trọng số của tổn thất điện nhân với giá trị cố định của điện bị mất (VoLL).



Hình 5. Sơ đồ các phương pháp dự báo giá các kịch bản ngoại sinh cho các khoản đầu tư trong tương lai (Exogenous scenarios for future investments) [26].



Hình 6. Cây kịch bản được triển khai thể hiện sự mở rộng của đối thủ cạnh tranh [6].



Hình 7. Sơ đồ phương pháp dự báo giá dựa trên tối ưu hóa.

3.3.3.2 Các ràng buộc

Ràng buộc cân bằng năng lượng: đối với mỗi bước thời gian t, tổng sản lượng điện và tổn thất điện năng bằng tổng nhu cầu.

$$\sum_{i=1}^I (g_{i,y,d,h} \times \Delta t) + ll_{y,d,h} = L_{y,d,h} \quad \forall i \in I, \forall y \in Y, \forall d \in D, \forall h \in H \quad (6)$$

Hạn chế về công suất đã lắp đặt: đối với mỗi năm, cơ cấu nguồn điện được cập nhật bằng cách thêm các khoản đầu tư mới và trừ đi các nhà máy ngừng vận hành.

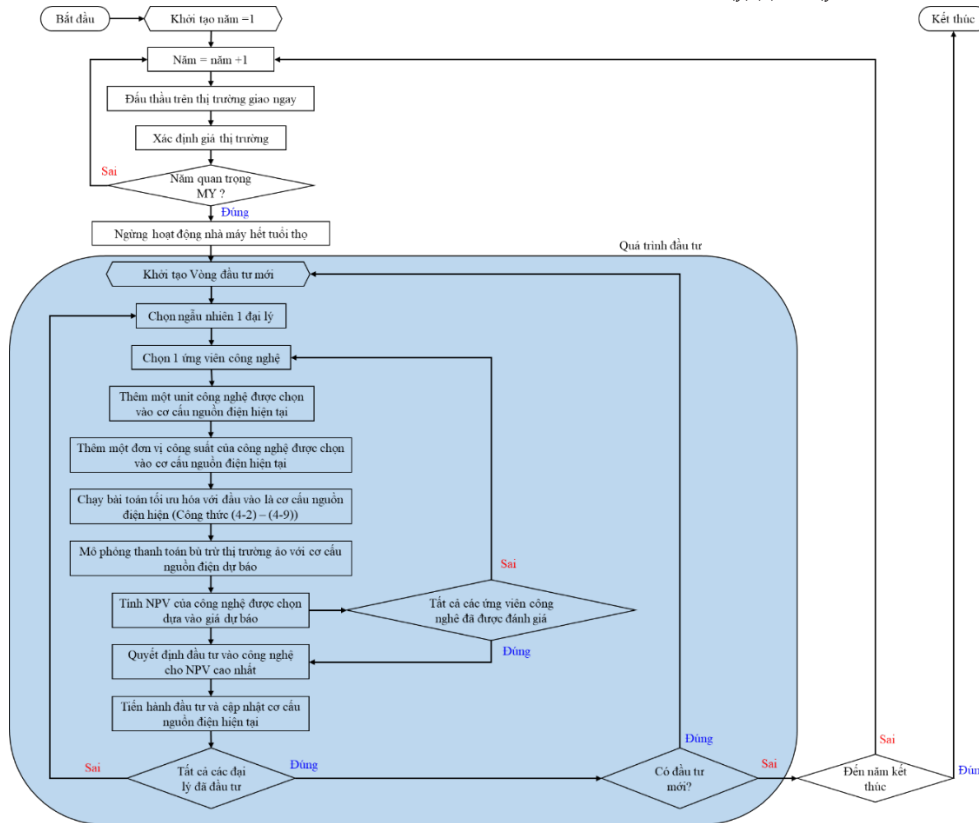
$$G_{i,y} = G_{i,y-1} + inv_{i,y-1} - dec_{i,y-1}, \forall i \in I, \forall y \in Y \quad (7)$$

Ràng buộc ngừng hoạt động: việc ngừng hoạt động của loại công nghệ i trong năm y là khoản đầu tư vào loại công nghệ i trong năm y-n_i, trong đó n_i là thời gian tồn tại của công nghệ.

$$dec_{i,y} = inv_{i,y-n_i}, \forall i \in I, \forall y \in Y \quad (8)$$

Giới hạn phát điện: sản lượng điện thực tế của từng loại công nghệ không âm và không được vượt quá công suất lắp đặt của công nghệ tương ứng.

$$0 \leq g_{i,y,d,h} \leq G_{i,y}, \forall i \in I, \forall y \in Y, \forall d \in D, \forall h \in H \quad (9)$$



Hình 8. Tổng quan về mô hình dựa trên đại lý với phương pháp dự báo giá mới được đưa vào quy trình đầu tư.

3.3.4. Thiết lập trường hợp nghiên cứu

3.3.4.1. Các giả định và cài đặt chính của mô hình dựa trên đại lý dài hạn

Nhằm mục đích đánh giá hiệu quả các phương pháp dự báo giá khác nhau, theo giả định về thông tin hoàn hảo và các đại lý hoàn toàn hợp lý, một mô hình dựa trên đại lý được hiệu chuẩn tốt sẽ đạt được hoặc ít nhất là gần đúng trạng thái cân bằng trong dài hạn. Với mục tiêu xác định điểm chuẩn của giải pháp so với giải pháp cân bằng dài hạn, tất cả các đại lý còn được giả định hoàn toàn hợp lý, hướng tới tương lai (forward-looking) và hoạt động như những người định giá (price taker).

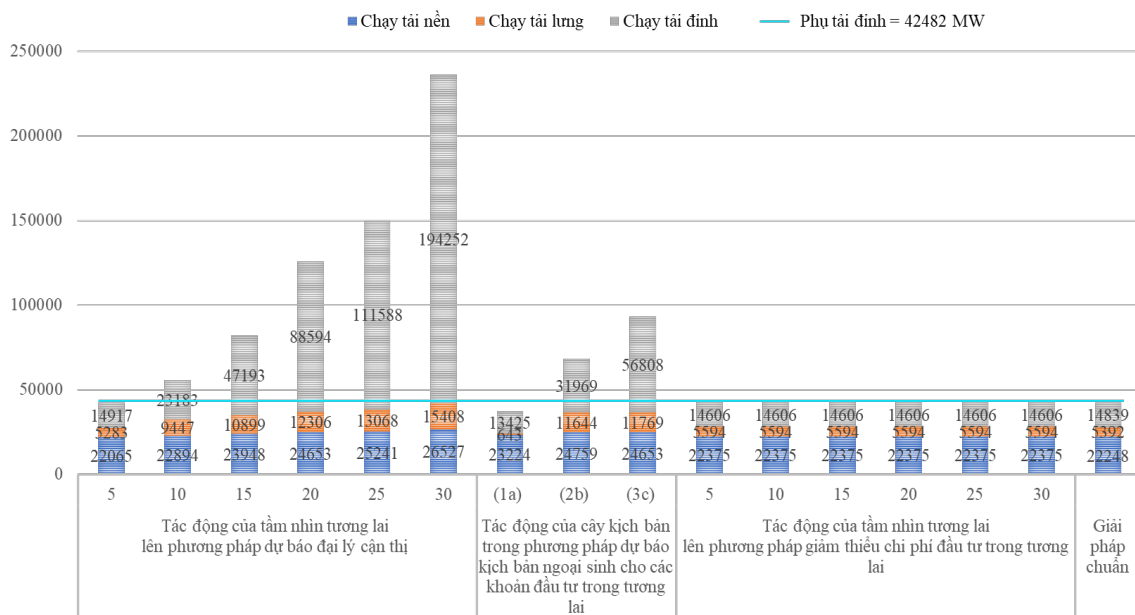
3.3.4.2. Cấu hình của phương pháp dự báo giá “Kịch bản ngoại sinh cho các khoản đầu tư trong tương lai”

Rất khó để ấn định các giá trị thích hợp (cả phân phối công nghệ và tổng công suất) cho các tình huống đại diện cho các khoản đầu tư trong tương lai sẽ được thực hiện bởi các đối thủ cạnh tranh. Để nghiên cứu ảnh hưởng của những kỳ vọng này, một phân tích độ nhạy được thực hiện trong đó các khoản đầu tư dự kiến ngoại sinh của các đối thủ cạnh tranh khác nhau cả về tổng công suất dự kiến sẽ được các đối thủ cạnh tranh bổ sung trong những năm tới cũng như về phân phối các công nghệ mà các đối thủ cạnh tranh dự kiến sẽ đầu tư. Về tổng công suất tăng thêm, chúng tôi cho rằng các đối thủ cạnh tranh đầu tư tới 85 %, 90 % và 95 % lượng tài chính. Về phân bố công nghệ, có ba trường hợp khác nhau được xem xét. Điều này dẫn

đến tổng cộng 9 trường hợp có thể xảy ra đối với các khoản đầu tư trong tương lai mà các đối thủ cạnh tranh dự kiến sẽ thực hiện. Các tổ hợp tham số và các thể tương ứng của 9 trường hợp này được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Các tham số được xem xét cho cây kịch bản mở rộng.

Tổng mức mở rộng của các đối thủ cạnh tranh	Phối phối (Tài nền/tài lưng/tài đỉnh)		
	0,2/0,5/0,3	0,3/0,2/0,5	0,5/0,3/0,2
0,95	(a)	(b)	(c)
0,9	(d)	(e)	(f)
0,85	(g)	(h)	(i)



Hình 9. Tổng quan về tác động của các thông số chính trong các phương pháp dự báo giá khác nhau đến kết quả cơ cấu nguồn điện.

4. Kết quả và thảo luận

Các tác động của các phương pháp dự báo giá này đối với các thuật toán ra quyết định đầu tư được phản ánh qua cơ cấu nguồn điện ở tương lai. Do đó, phân tích độ nhạy được thực hiện đối với các tham số chính tương ứng của các phương pháp dự báo giá khác nhau.

- i. Tầm nhìn tương lai (look-ahead horizon) trong phương pháp “đại lý cận thị (myopic agent)” và phương pháp “tối thiểu hóa chi phí đầu tư trong tương lai”
- ii. Các giá trị được gán cho cây kịch bản (scenario tree) trong phương pháp “kịch bản ngoại sinh cho các khoản đầu tư trong tương lai”

Hình 9 cung cấp một cái nhìn tổng quan về cơ cấu nguồn điện dự báo được đưa ra từ các phương pháp dự báo giá khác nhau và độ nhạy tương ứng của chúng. Giải pháp chuẩn để so sánh cho tất cả các mô phỏng là cân bằng dài hạn, được tính toán bằng mô hình lập kế hoạch mở rộng công suất lấy dữ liệu đầu vào giống như mô hình dựa trên đại lý.

Có thể thấy, các phương pháp dự báo giá “đại lý cận thị (myopic agent)” và “kịch bản ngoại sinh cho các khoản đầu tư trong tương lai” bị ảnh hưởng nhiều bởi các thông số chính tương ứng của chúng. Điều này được phản ánh bởi kết quả cơ cấu nguồn điện trong tương lai rất khác nhau. Mặt khác, phương pháp dự báo giá “giảm thiểu chi phí đầu tư trong tương lai” được đưa ra để ước lượng một cách có hệ thống đến giải pháp cân bằng dài hạn. Các phần sau đây cung cấp phân tích chi tiết về từng độ nhạy được xem xét.

4.3. Phân tích độ nhạy của tầm nhìn tương lai (look-ahead horizon)

Như được thể hiện trong Hình 9, các kết quả mô phỏng có độ nhạy cao đối với tham số tầm nhìn tương lai (look-ahead horizon) khác nhau khi sử dụng phương pháp dự báo giá "đại lý cận thị". Cụ thể hơn, khoản đầu tư quá mức ngày càng lớn khi Tầm nhìn tương lai (look-ahead horizon) với khoảng thời gian xa hơn. Công nghệ tài chính chiếm hầu hết các khoản đầu tư quá mức. Các kết quả mô phỏng của mô hình dựa trên đại lý với phương pháp dự báo giá "giảm thiểu chi phí đầu tư trong tương lai" mạnh mẽ hơn trong các tầm nhìn xa hơn và gần đúng với giải pháp chuẩn. Điều này chỉ ra rằng mô hình dựa trên đại lý dài hạn, với thuật toán ra quyết định đầu tư được tích hợp, có thể dùng làm chuẩn lý thuyết lý tưởng để mở rộng thêm mô hình.

Kết quả trong Hình 9 cho thấy rằng việc sử dụng phương pháp dự báo giá "đại lý cận thị" với tầm nhìn xa trong vòng 5 năm có thể gần đúng với mức cân bằng dài hạn. Nguyên nhân là do sử dụng khoảng cách 5 năm có nghĩa là các đại lý chỉ đưa ra quyết định đầu tư dựa trên tình trạng hệ thống trong năm quan trọng (MY) đầu tiên, do đó, sự khan hiếm quan sát được là việc ngừng hoạt động gần đây và không có thông tin nào trong tương lai được xem xét. Trong một thị trường cạnh tranh hoàn hảo, các đại lý tối đa hóa lợi nhuận sẽ đưa ra các quyết định đầu tư nhằm lấp đầy khoảng trống theo cách giảm thiểu chi phí hệ thống.

Khi đại lý đưa ra quyết định đầu tư với giả định rằng không có khoản đầu tư mới nào xảy ra, như thể hiện trong Hình 10a, đại lý đầu tiên trong vòng đầu tư đầu tiên sẽ cảm nhận được khoản đầu tư được công bố bằng 0 (vì không có khoản đầu tư nào trước đó trong năm quan trọng này). Cùng với thực tế là tất cả các công suất hiện có sẽ ngừng hoạt động sau bốn đến năm năm quan trọng (sau 20-25 năm), vì các công suất hiện có mới nhất là các khoản đầu tư vào năm quan trọng trước đó, là 5 năm trước. Điều này dẫn đến sự thiếu hụt công suất dự kiến rất lớn trong năm quan trọng thứ, mặc dù tình trạng thừa công suất đã tồn tại trong năm quan trọng đầu tiên. Trong việc thanh toán bù trừ thị trường ảo, sự thiếu hụt công suất này được chuyển thành dự báo giá điện tương ứng với giá trần trong cả năm, rõ ràng là không thực tế. Mức giá dự báo cao vào cuối tầm nhìn tương lai look-ahead horizon khuyến khích các khoản đầu tư cho đến khi thiếu hụt về nguồn cung trong tương lai gần như được lấp đầy. Ngoài ra, kỳ vọng thiếu hụt nguồn cung và giá điện cao tương ứng xảy ra trong 5 năm cuối có nghĩa là lựa chọn đầu tư được xem xét có xu hướng chủ yếu được đưa ra trong giai đoạn này. Với số giờ hoạt động dự kiến thấp, công nghệ có chi phí cố định thấp nhất được ưa chuộng, điều này giải thích tại sao công nghệ tài chính chiếm hầu hết các khoản đầu tư quá mức.

Hình 10b minh họa cơ cấu nguồn điện mà các đại lý dự đoán với phương pháp dự báo "giảm thiểu chi phí đầu tư trong tương lai". Trong trường hợp như vậy, các đại lý có khả năng vừa thiết lập các kỳ vọng về các khoản đầu tư trong tương lai vừa duy trì các kỳ vọng này theo đặc tính nội tại của hệ thống. Hơn nữa, tầm nhìn tương lai (look-ahead horizon) không còn ảnh hưởng đến các quyết định đầu tư vì việc đầu tư không còn bị khuyến khích bởi giá điện cao phi thực tế chỉ phát sinh trong năm quan trọng cuối cùng, mà do giá điện được phân phối đồng nhất trong toàn bộ tầm nhìn tương lai (look-ahead horizon).

4.4. Phân tích độ nhạy về các giá trị được gán cho cây kịch bản trong phương pháp dự báo giá "các kịch bản ngoại sinh cho các khoản đầu tư trong tương lai"

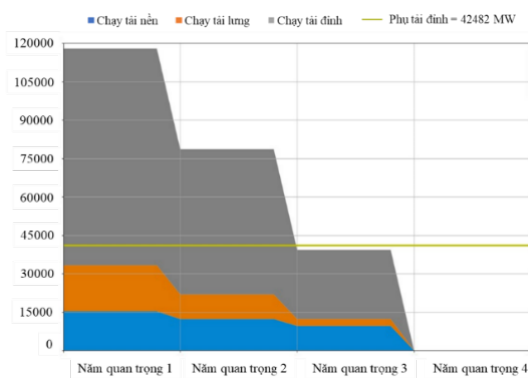
Ở đại lý cấp độ vi mô, kỳ vọng của đại lý về kế hoạch mở rộng của đối thủ cạnh tranh ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định đầu tư của họ bằng cách thay đổi giá điện trong tương lai. Các quyết định đầu tư bị ảnh hưởng này cuối cùng sẽ được phản ánh ở cấp độ hệ thống vi mô dưới dạng các biến thể của cơ cấu nguồn điện. Hình 11 thể hiện kết quả cơ cấu nguồn điện cho các trường hợp khác nhau của dự báo mở rộng nguồn điện của đối thủ cạnh tranh. Kết quả cơ cấu nguồn điện cấp hệ thống vi mô cho từng trường hợp được thể hiện trong hình 11 và tóm tắt trong Bảng 3.

Nhìn chung, có thể nhận thấy rằng kết quả mô phỏng thay đổi phần lớn tùy thuộc vào các đầu vào ngoại sinh được sử dụng. Đầu tiên, bằng cách so sánh cơ cấu nguồn điện hệ thống đối với các kỳ vọng khác nhau liên quan đến tổng công suất dự kiến sẽ được bổ sung bởi các đối thủ cạnh tranh trong tương lai, người ta có thể nhận thấy rằng việc giảm kỳ vọng vào tổng mức mở rộng của đối thủ cạnh tranh (từ 95 % xuống 90 % và 85 %) dẫn đến tổng công suất hệ thống tăng đáng kể và ngược lại. Một mặt, khi kỳ vọng rằng các đối thủ cạnh tranh sẽ hạn chế đầu tư dẫn đến giá điện cao không thực tế trong tương lai và giá điện cao này kích hoạt các khoản đầu tư cho đến khi lấp đầy khoảng trống cung ứng trong tương lai. Mặt khác, khi kỳ vọng các đối thủ cạnh tranh sẽ đầu tư nhiều trong tương lai, các đại lý sẽ hạn chế đầu tư và dẫn đến tình trạng thiếu hụt đầu tư, tức là tất cả các đại lý thiếu động cơ đầu tư vì họ đánh giá quá cao về các khoản đầu tư trong tương lai của đối thủ cạnh tranh.

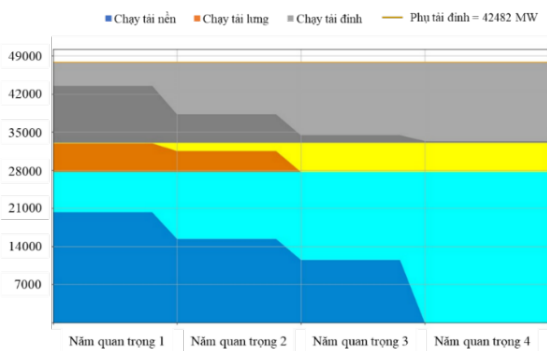
Thứ hai, bằng cách so sánh các dự báo khác nhau về sự phân bổ công nghệ của các khoản đầu tư trong tương lai của các đối thủ cạnh tranh, có thể thấy rằng sự phân bổ công nghệ giả định có thể dẫn đến sự thay đổi đáng kể trong cơ cấu nguồn điện. Cụ thể hơn, đối thủ cạnh tranh càng mong đợi một loại công nghệ nào đó đầu tư vào thì đại lý càng ít đầu tư vào công nghệ này và ngược lại. Hãy xem xét Nhóm 1 của Hình 10 làm ví dụ. Khi tỷ lệ đầu tư dự kiến

trong tương lai vào công nghệ tài đỉnh tăng từ 20 % lên 30 % và 50 %, tỷ lệ đầu tư công nghệ tài đỉnh trong kết quả mô phỏng giảm lần lượt từ 40,8 % xuống 36 % và 22,7 %. Xu hướng tương tự cũng diễn ra đối với các khoản đầu tư vào công nghệ tài nền. Đối với công nghệ tài lưỡng phức tạp hơn do tiềm năng kinh tế để đầu tư vào công nghệ tài lưỡng cũng bị ảnh hưởng mạnh bởi các khoản đầu tư dự kiến vào công nghệ tài nền và tài đỉnh.

Ngoài ra, mặc dù các thông số phân bổ công suất khác nhau thay đổi cơ cấu nguồn điện, nhưng tổng công suất vẫn không đổi trong một cài đặt về tổng mức công suất mở rộng. Nghĩa là, tổng lượng công suất lắp đặt hoàn toàn được thúc đẩy bởi việc thiết lập tổng lượng mở rộng dự kiến của đối thủ cạnh tranh, thay vì các đặc điểm nội tại của mô hình.



a. "Đại lý cận thị - Myopic agents".



b. "Giảm thiểu chi phí đầu tư trong tương lai".

Hình 10. Dự báo cơ cấu nguồn điện của đại lý đầu tiên quyết định đầu tư trong vòng đầu tư đầu tiên trong một năm quan trọng điển hình.

4.3. Đóng góp và hạn chế

Phân tích ở trên cho thấy rằng các giả định được áp dụng bởi các thuật toán ra quyết định đầu tư ở cấp đại lý có thể ảnh hưởng lớn đến kết quả mô phỏng ở cấp hệ thống. Cụ thể, cơ cấu nguồn điện rất

nhạy cảm với tham số Tầm nhìn tương lai (Look-ahead horizon) khi sử dụng phương pháp dự báo giá "đại lý cận thị". Điều này là do phương pháp này mặc nhiên giả định rằng không có khoản đầu tư mới nào sẽ xảy ra trong tương lai và do đó sẽ phát sinh chênh lệch cung, điều này sẽ kích hoạt các khoản đầu tư mới vào năm quan trọng của đại lý để bù đắp cho tình trạng thiếu công suất không thực tế trong tương lai xa hơn.

Kiểm tra phương pháp dự báo giá "kịch bản ngoại sinh cho các khoản đầu tư trong tương lai" cho thấy rằng, các giá trị được gán cho cây kịch bản liên quan đến các khoản đầu tư của đối thủ cạnh tranh ở cấp đại lý đang chiếm ưu thế trong kết quả mô phỏng ở cấp hệ thống. Nhìn chung, hai lớp trên cây kịch bản chi phối các khía cạnh khác nhau của kết quả mô phỏng: tổng công suất lắp đặt được thúc đẩy bởi kỳ vọng về tổng đầu tư của đối thủ cạnh tranh và tỷ trọng của các loại công nghệ khác nhau chủ yếu bị ảnh hưởng bởi lớp thứ hai của cây kịch bản (tức là cách các khoản đầu tư mới của đối thủ cạnh tranh được phân bổ giữa các công nghệ). Như đã trình bày, phương pháp dự báo giá "giảm thiểu chi phí đầu tư trong tương lai" được đề xuất yêu cầu ít tham số ngoại sinh hơn (tức là cây kịch bản) và mạnh mẽ hơn đối với tham số Tầm nhìn tương lai (Look-ahead horizon).

Tuy nhiên, dự báo giá mới được đề xuất và phân tích được thực hiện trong nghiên cứu này có một số hạn chế. Từ quan điểm phương pháp luận, việc sử dụng kết quả thu được từ một bài toán lập kế hoạch mở rộng tổng thể để hướng dẫn việc ra quyết định đầu tư mặc nhiên giả định rằng các đại lý đang mong đợi sự kết hợp công suất phát triển theo cách tiết kiệm chi phí. Trên thực tế, thị trường điện còn phức tạp hơn. Hơn nữa, lưu ý rằng phân tích được thực hiện trong một hệ thống điện được cách điệu hóa cao, nơi các đại lý bị lược bỏ các đặc điểm khác biệt như các yếu tố hành vi. Trên thực tế, tồn tại nhiều yếu tố hành vi ảnh hưởng đến việc ra quyết định đầu tư. Việc tính toán các yếu tố này có thể làm sai lệch kết quả so với kết quả thị trường hoàn hảo và có thể giảm thiểu tác động của các giả định cơ bản của phương pháp dự báo giá hiện tại đối với kết quả của mô hình. Ví dụ, việc sử dụng các đại lý không thích rủi ro có thể làm giảm độ nhạy của tham số tầm nhìn tương lai (Look-ahead horizon) vì lợi nhuận không thực tế trong tương lai xa phải chịu mức chiết khấu rất cao. Do đó, các phương pháp dự báo giá hiện có, nếu được tham số hóa đầy đủ, cũng có thể ước tính các kết quả thực nghiệm.

3. Kết luận

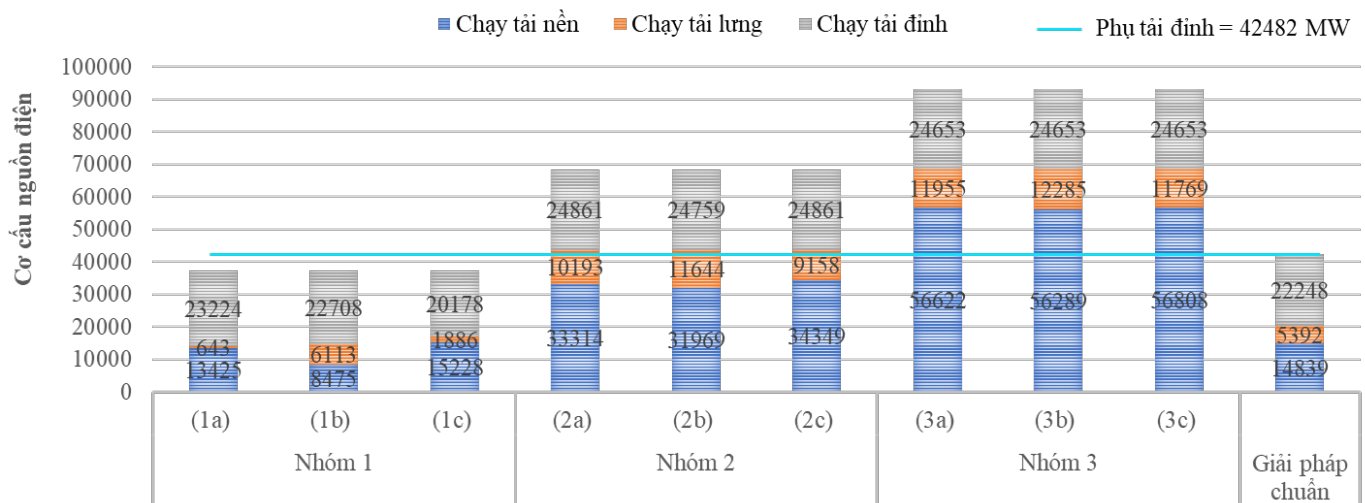
Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, trong một thị trường điện có lập với các thiết lập mô hình được cách điệu hóa cao, các quyết định đầu tư được thực hiện bởi các thuật toán đầu tư hiện có rất nhạy

cảm với các giả định liên quan đến các tham số của thuật toán ra quyết định đầu tư. Do những khó khăn để hiệu chỉnh các giá trị này một cách chính xác, độ tin cậy và tính minh bạch của các kết quả mô phỏng có thể bị ảnh hưởng bởi việc lựa chọn các tham số chính. Do đó, điều quan trọng đối với các nhà lập mô hình là phải nhận thức rõ về những ảnh hưởng do các giá trị giả định và các tham số chính này áp đặt. Phân tích sâu hơn đã chỉ ra rằng mô hình dựa trên đại lý - với phương pháp dự báo giá “giảm thiểu chi phí đầu tư trong tương lai” được đề xuất áp dụng là mạnh mẽ và minh bạch hơn trong các thiết

lập mô hình lý thuyết được sử dụng trong nghiên cứu này. Mô hình dựa trên đại lý này, với phương pháp dự báo giá được đề xuất được, cho phép các nhà lập mô hình dựa trên đại lý giảm thiểu các tác động tiềm ẩn của các giả định ngầm (liên quan đến việc mô hình hóa các khía cạnh hành vi cụ thể) và ảnh hưởng của các biến kiểm soát (ví dụ như các công cụ chính sách), do đó mở đường hướng tới các mô hình mô phỏng hệ thống điện dựa trên đại lý dài hạn minh bạch, không thiên vị và mạnh mẽ trong tương lai.

Bảng 3. Công suất các công nghệ khác nhau trong cơ cấu nguồn điện (đơn vị: MW).

Công nghệ	Nhóm 1			Nhóm 2			Nhóm 3		
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
Tài nền	13425	8475	15228	33314	31969	34349	56622	56289	56808
Tài lưng	643	6113	1886	10193	11644	9158	11955	12285	11769
Tài đỉnh	23224	22708	20178	24861	24759	24861	24653	24653	24653
Tổng cộng	37292	37295	37292	68369	68372	68369	93230	93227	93230



Hình 11. Cơ cấu nguồn điện với các dự báo mở rộng của các đối thủ cạnh tranh khác nhau.

Tài liệu tham khảo

[1]. A. Weidlich and D. Veit, “A critical survey of agent-based wholesale electricity market models,” *Energy Economics*, vol. 30, no. 4, pp. 1728–1759, Jul. 2008, doi: 10.1016/J.ENECO.2008.01.003.

[2]. P. Ringler, D. Keles, and W. Fichtner, “Agent-based modelling and simulation of smart electricity grids and markets – A literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 205–215, May 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.12.169.

[3]. M. Genoese, F. Genoese, and W. Fichtner, “Model-based analysis of the impact of capacity markets on electricity markets,” 9th International Conference on the European Energy Market, EEM 12, 2012, doi: 10.1109/EEM.2012.6254704.

[4]. F. Sensfuß and M. Genoese, “Agent-based simulation for the German electricity markets - An analysis of the German spot market prices in the year 2001,” *Dritte Energiepreiskrise - Anforderungen an die Energieinnovation - Kurzfassungsband / 9. Symposium Energieinnovation*, 15. - 17. Februar 2006, TU Graz, Graz/Österreich, p. 76, 2006, Accessed: Nov. 11, 2021. [Online]. Available: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000018291>

[5]. M. Reeg et al., “AMIRIS - An agent-based simulation model for the analysis of different support schemes and their effects on actors involved in the integration of renewable energies into energy markets,” *Proceedings - International Workshop on*

- Database and Expert Systems Applications, DEXA, pp. 339–344, 2012, doi: 10.1109/DEXA.2012.54.
- [6]. A. Botterud, M. R. Mahalik, T. D. Veselka, H. S. Ryu, and K. W. Sohn, “Multi-agent simulation of generation expansion in electricity markets,” 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, 2007, doi: 10.1109/PES.2007.385566.
- [7]. M. North, G. Conzelmann, V. Koritarov, C. Macal, P. Thimmapuram, and T. Veselka, “E-laboratories: agent-based modeling of electricity markets,” undefined, 2002.
- [8]. J. C. Richstein, “Interactions between carbon and power markets in transition,” 2015. doi: 10.4233/UUID:0E1DCC59-40F0-4FF9-A330-C185FDFCA119.
- [9]. E. J. L. Chappin, L. J. de Vries, J. C. Richstein, P. Bhagwat, K. Iychettira, and S. Khan, “Simulating climate and energy policy with agent-based modelling: The Energy Modelling Laboratory (EMLab),” *Environmental Modelling & Software*, vol. 96, pp. 421–431, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.ENVSOF.2017.07.009.
- [10]. L. de Vries, E. Chappin, and J. Richstein, “EMLab-Generation: An experimentation environment for electricity policy analysis,” 2013, doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.
- [11]. V. Grimm et al., “A standard protocol for describing individual-based and agent-based models,” *Ecological Modelling*, vol. 198, no. 1–2, pp. 115–126, Sep. 2006, doi: 10.1016/J.ECOLMODEL.2006.04.023.
- [12]. K. Poncet, E. Delarue, and W. D’haeseleer, “Unit commitment constraints in long-term planning models: Relevance, pitfalls and the role of assumptions on flexibility,” *Applied Energy*, vol. 258, p. 113843, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.113843.
- [13]. H. Chen, C. Wang, W. Cai, and J. Wang, “Simulating the impact of investment preference on low-carbon transition in power sector,” *Applied Energy*, vol. 217, pp. 440–455, May 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.02.152.
- [14]. R. Wüstenhagen and E. Menichetti, “Strategic choices for renewable energy investment: Conceptual framework and opportunities for further research,” undefined, vol. 40, no. 1, pp. 1–10, 2012, doi: 10.1016/J.ENPOL.2011.06.050.