

OPTIMIZING OPERATION OF MICRO-ENERGY NETWORK BASED ON COMBINED COOLING, HEATING AND POWER (CCHP) MODEL, EXTENDING TO ENERGY-HEAT GENERATOR WITH THE USE OF ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC)

Pham Thi Hong Anh^{1*}, Pham Thi Ngoc Dung²

¹TNU - University of Information and Communication Technology

²TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 04/3/2022 Revised: 29/5/2022 Published: 31/5/2022	The Combined Cooling, Heating and Power model (CCHP) is considered the foundation for forming an integrated network of different types of energy – including the Energy Hub (EH) model. This paper proposes and develops an operating strategy for an integrated model of many different forms of energy at a small scale, including electricity, natural gas, solar power, wind, storage, cooling, heating and particularly the waste heat generation system based on the Organic Rankine Cycle (ORC). The optimization problem is set up with a multi-objective function to minimize primary energy consumption and carbon emissions. Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is used to solve the problem of optimizing the operation of each element in the model. Finally, comparative analysis of the proposed model with the Micro grid (MG) is performed to show the advantages in saving energy and reducing emissions.
KEYWORDS Micro – energy networks Natural gas Electricity Optimal operation Energy hub CCHP	

VẬN HÀNH TỐI ƯU MẠNG LƯỚI NĂNG LƯỢNG SIÊU NHỎ TRÊN CƠ SỞ MÔ HÌNH LÀM MÁT, GIA NHIỆT KẾT HỢP NĂNG LƯỢNG ĐIỆN (COMBINED COOLING, HEATING AND POWER - CCHP) MỞ RỘNG CÓ XÉT ĐẾN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN – NHIỆT DỰA TRÊN CHU TRÌNH RANKINE HỮU CƠ (ORGANIC RANKINE CYCLE - ORC)

Phạm Thị Hồng Anh^{1*}, Phạm Thị Ngọc Dung²

¹Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 04/3/2022 Ngày hoàn thiện: 29/5/2022 Ngày đăng: 31/5/2022	Mô hình làm mát, sưởi ấm kết hợp năng lượng điện (Combined Cooling, Heating and Power - CCHP) được xem là cơ sở ban đầu cho việc xây dựng và hình thành nên mạng lưới tích hợp các dạng năng lượng khác nhau - trong đó có mô hình Energy Hub (EH). Bài báo này đề xuất và xây dựng chiến lược vận hành cho mô hình tích hợp của nhiều dạng năng lượng khác nhau ở quy mô nhỏ bao gồm điện năng, khí tự nhiên, điện mặt trời, gió, tích trữ, làm mát, gia nhiệt và đặc biệt có xét đến hệ thống phát điện nhiệt thải dựa trên chu trình Rankine hữu cơ (ORGANIC RANKINE CYCLE - ORC). Bài toán tối ưu được thiết lập với hàm đa mục tiêu là giảm thiểu tiêu thụ năng lượng sơ cấp và phát thải Carbon. Thuật toán tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization - PSO) được sử dụng để giải quyết vấn đề tối ưu hoạt động của các phần tử trong mô hình. Cuối cùng, thực hiện phân tích so sánh mô hình đề xuất với lưới điện siêu nhỏ (Micro grid – MG) để làm rõ những lợi thế trong việc tiết kiệm năng lượng và giảm lượng khí thải ra môi trường.
TỪ KHÓA Mạng năng lượng siêu nhỏ Khí tự nhiên Năng lượng điện Vận hành tối ưu Trung tâm Năng lượng CCHP	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5611>

* Corresponding author. Email: pthanh@ictu.edu.vn

1. Giới thiệu

Trước những vấn đề ngày càng nổi cộm về cạn kiệt năng lượng (NL), ô nhiễm môi trường và biến đổi khí hậu; hệ thống mạng lưới NL phân tán lấy nguồn NL sạch làm chủ đạo ngày càng được quan tâm nhiều hơn. Năm 2011, học giả người Mỹ Jeremy Rifkin lần đầu tiên đưa ra tầm nhìn về mạng lưới NL (Energy internet - EI) trong cuốn “Cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 3” [1] đã chỉ ra rằng để tăng cường xây dựng mạng lưới NL một cách toàn diện, sự tương tác kết hợp giữa các dạng NL khác nhau như NL điện, khí, nhiệt, lạnh đã trở thành một trong những điểm nóng nghiên cứu [2]-[4].

Hệ thống làm mát, sưởi ấm kết hợp NL điện (Combined Cooling, heating and power - CCHP) và tuabin khí là mô hình cơ sở cho việc xây dựng tích hợp trung tâm NL (Energy Hub – EH). Trên quan điểm đó, khái niệm về mô hình mạng lưới điện phân tán siêu nhỏ (Micro grid – MG) cũng dần được chuyển thành Micro Energy networks (MEN) [5]-[7]. Một số nghiên cứu điển hình như: X. D. Xue, (2016) đã thiết lập một mô hình đa mục tiêu cho CCHP, sử dụng thuật toán di truyền để tối ưu hóa công suất thiết bị hệ thống và chế độ vận hành, đồng thời phân tích tác động của giá NL và lưu trữ NL đến lợi ích chung của nó [8]. Trên cơ sở phân tích những cơ hội mới mà việc nghiên cứu và phát triển hệ thống CCHP phân tán phải đối mặt, nhóm tác giả M. Geidl và G. Andersson, (2003) đề xuất một mô hình mới phối hợp hiệu quả với hệ thống điện [9]; Z. Chen và các đồng sự của mình đã xây dựng mô hình hệ thống đồng phát dựa trên lý thuyết về mô hình EH, đưa ra ba chế độ hoạt động là tách hoàn toàn, ghép từng phần và ghép hoàn toàn của hệ thống NL [10]; nhóm nghiên cứu của M. Arnold, R. Negenborn, và G. Andersson, (2010) đã thiết lập mô hình lập trình tuyến tính số nguyên hỗn hợp cho cấu hình tối ưu phối hợp công suất của hệ thống CCHP đa vùng dựa trên các ràng buộc cân bằng NL và mô hình mạng lưới nhiệt [11]; Trương tự, tác giả X. Zhao cùng các đồng sự đã đề xuất mô hình quy hoạch với độ tin cậy tối ưu kết nối giữa NL điện và khí tự nhiên trong các trung tâm NL [12], đồng thời chứng minh hiệu quả của nó thông qua mô phỏng, qua đó cho thấy việc nghiên cứu kết hợp giữa làm mát, sưởi ấm, điện và khí đốt là cần thiết. Tuy vậy, các mục tiêu nghiên cứu trên chỉ giới hạn trong hệ thống CCHP mà không tính đến việc tiếp cận các nguồn NL khác.

EH cho phép kết nối nhiều dạng NL khác nhau như NL mặt trời, gió và các thiết bị lưu trữ vào CCHP. Cụ thể, phân tích về chế độ hoạt động và đánh giá các chỉ số của hệ thống sau khi kết nối bổ sung NL mặt trời [13]; thiết lập mô hình toán học để tối ưu hóa hệ thống lưu trữ và cắt giảm đỉnh của đồ thị phụ tải, đồng thời tiến hành phân tích trên cơ sở giảm thiểu chi phí NL [14]. Tuy nhiên, nghiên cứu này chưa xem xét đến khía cạnh NL và môi trường; Một số nghiên cứu khác lấy mô hình EI làm nền tảng để nghiên cứu mối quan hệ chuyển hóa tương đương giữa các dạng NL khác nhau [15] –[17], qua đó xem xét tỷ lệ và hiệu quả của từng loại hình NL sử dụng thuật toán bầy đàn nhưng chưa xét đến sự chuyển đổi giữa nhiệt và điện.

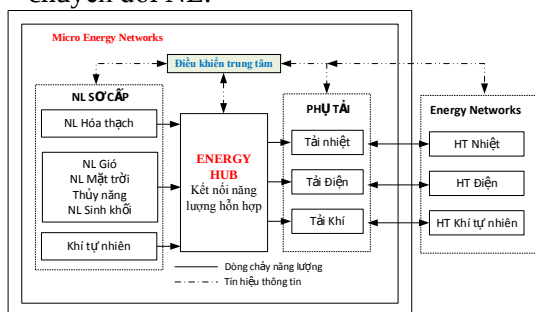
Với mô hình EI, kết nối đa NL đã trở thành xu hướng phát triển tất yếu. Thêm vào đó, sự tiến bộ vượt bậc về mặt công nghệ nguồn phân tán cũng là một trong những yếu tố dẫn đến sự phát triển của MEN. Trên cơ sở những nghiên cứu đầy đủ trước đây về mô hình CCHP, nghiên cứu này đầu tiên tiến hành bổ sung thêm hệ thống phát điện – nhiệt dựa trên chu trình Rankine hữu cơ (Organic Rankine Cycle - ORC) nhằm tái sử dụng lượng nhiệt dư thừa, đồng thời kết hợp với hai dạng nguồn NL sạch là mặt trời và gió. Mỗi dạng NL kết hợp qua EH tạo thành trung tâm NL vì mô có thể truyền dẫn, chuyển đổi và lưu trữ. Tiếp theo, vấn đề tối ưu hóa được xem xét một cách toàn diện bằng cách thiết lập mô hình toán học của từng phần tử, phân tích chiến lược điều khiển và chế độ vận hành của chúng để tiến tới tối ưu đa mục tiêu bao gồm: chi phí kinh tế, mức NL tiêu thụ và phát thải môi trường. Cuối cùng là phần thảo luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. Mạng NL siêu nhỏ (Micro Energy Networks – MEN)

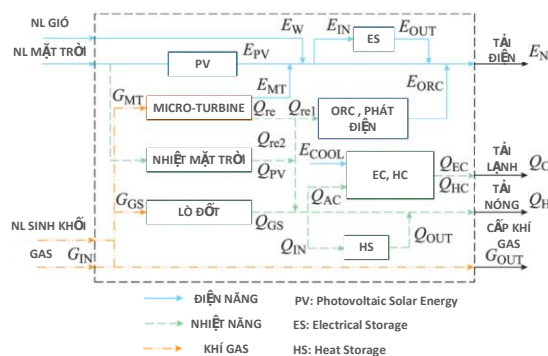
2.1. Cấu trúc

MEN có thể được định nghĩa là một hệ thống cung cấp NL toàn diện quy mô nhỏ tích hợp nhằm liên kết, chuyển đổi, ghép nối, lưu trữ NL với mục tiêu chính làm cải thiện tỷ lệ sử dụng

NL, giảm chi phí cho người sử dụng và giảm thiểu ô nhiễm môi trường (Hình 1). Thực chất MEN phát triển dựa trên nền tảng của cấu trúc trung tâm năng lượng (Energy hub, EH). NL chính của MEN là khí tự nhiên, tận dụng triệt để NL tái tạo như NL mặt trời, NL gió và NL sinh khối, do đó giảm thiểu việc sử dụng của NL hóa thạch truyền thống như than đá và dầu mỏ, đáp ứng yêu cầu của nhiều loại hình phụ tải như: tải làm mát, nhiệt, điện và khí theo yêu cầu của người sử dụng. Đồng thời, MEN sử dụng điện và chức năng lưu trữ nhiệt để cải thiện đặc tính ổn định của việc cung cấp NL. MEN có thể hoạt động độc lập, khi không đáp ứng được nhu cầu phụ tải hoặc sản lượng NL dư thừa, nó cũng có thể được kết nối với mạng NL để hoàn thành quá trình truyền – chuyển đổi NL.



Hình 1. Cấu trúc MEN



Hình 2. Xây dựng mô hình tích hợp EH trên cơ sở CCHP

Bài báo này đề xuất cấu trúc trung tâm kết nối nhiều dạng NL khác nhau như trong hình 2. Trong đó, mô hình CCHP truyền thống đã được cải tiến và nâng cấp dựa trên ORC được xem xét trong quá trình xử lý nhiệt. Đồng thời, mô hình này bổ sung thêm dạng nguồn NL tái tạo và hệ thống lưu trữ NL. Do những hạn chế nhất định trong việc phát triển và sử dụng NL thủy điện và địa nhiệt, để thuận tiện cho việc mô tả, một số nguồn NL tái tạo điển hình như NL gió, NL sinh khối và NL mặt trời được lựa chọn. NL gió có thể trực tiếp được chuyển đổi thành NL điện E_W thông qua turbine sản xuất điện gió; NL sinh khối được chuyển đổi thành khí sinh học và được đưa vào bình lưu khí sau khi lọc. NL mặt trời có thể được sử dụng cho cả phát điện và thu nhiệt. Các dạng đầu ra tương ứng là NL điện E_{PV} điện và nhiệt năng Q_{PV} ; Tua bin khí tạo ra NL điện E_{MT} và lượng nhiệt còn lại sau quá trình phát.

Hình 2 cho thấy nhiệt năng còn lại Q_{re} do khí thải của Microturbine (MT) được sử dụng tiếp cho bộ tạo nhiệt ORC để tạo ra NL điện (Q_{re1}), phần nhiệt còn lại Q_{re2} được kết hợp cùng lượng nhiệt chuyển hóa từ mặt trời Q_{PV} , nhiệt từ lò đốt Q_{GS} để cung cấp cho tải nóng, cho bộ chuyển đổi nhiệt – lạnh (dàn lạnh hấp thụ) nhằm đáp ứng nhu cầu sử dụng đa dạng. Tải làm mát cũng được kết nối với thiết bị lưu trữ nhiệt để thực hiện việc lưu trữ và giải phóng NL nhiệt; tải này được cung cấp bởi máy làm lạnh hấp thụ và máy làm lạnh điện (công suất đầu vào là E_{COOL}) nhằm hỗ trợ, bổ sung công suất cho nhau.

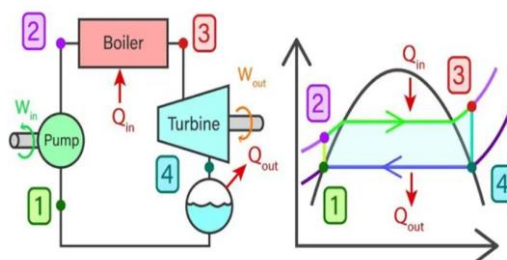
Mô hình EH được đề xuất bao gồm nhiều dạng NL khác nhau nhằm kết nối và đáp ứng được đa dạng loại hình phụ tải. Đặc biệt, mô hình này được mở rộng nội hàm khi bổ sung thiết bị ORC giúp tận dụng tối đa lượng nhiệt thứ cấp của Microturbine. Qua đó cho thấy, EH không chỉ là một thiết bị chịu trách nhiệm truyền và chuyển hóa NL mà còn tạo thành một lõi điều khiển bổ sung nhiều dạng NL khác nhau kết nối với trung tâm điều khiển. EH có thể điều chỉnh dòng NL theo thời gian thực và đáp ứng nhanh với sự thay đổi của hệ thống. Đây được coi là xu hướng phát triển của EI.

2.2. Chu trình Rankine hữu cơ (ORC)

Theo [18], hệ thống tuần hoàn môi chất hữu cơ (ORC) (hình 3) là một trong những giải pháp hiệu quả trong việc tận dụng nhiệt thải trung bình và thấp để sản xuất điện. ORC sử dụng loại

chất hữu cơ làm môi chất tuần hoàn cho hệ thống, thích hợp cho việc ứng dụng thu hồi nguồn nhiệt thải NL thấp như NL sinh khối, lượng nhiệt thải sau các turbine khí.v.v. Từ nhiều năm trước, các môi chất hữu cơ có nhiệt độ sôi thấp đã được quan tâm, nghiên cứu và ứng dụng như: Benzen (C_6H_6 , $C_6H_5CH_3$, R123, R113) trong các ngành công nghiệp như đóng tàu, xi măng, lọc hóa dầu... Nhiệt độ thấp có thể chuyển đổi thành công hữu ích như chuyển đổi trực tiếp sang điện năng. Đây là giải pháp đơn giản nhưng hiệu quả để tận dụng nguồn nhiệt thải dồi dào nhưng chưa được sử dụng để chuyển thành điện mà không phát thải CO_2 , giúp các doanh nghiệp sản xuất giảm chi phí NL, mang lại lợi ích kinh tế và góp phần bảo vệ môi trường, hướng đến mục tiêu phát triển bền vững.

Nguyên lý làm việc của chu trình Rankine hữu cơ cũng giống như chu trình Rankine: chất lỏng làm việc được bơm (Pump) bơm đến lò hơi (Boiler), nơi nó được làm bay hơi, đi qua thiết bị giãn nở (Sự giãn nở của hơi trong turbine) và sau đó qua bộ trao đổi nhiệt bình ngưng (Condenser), nơi cuối cùng nó được ngưng tụ lại.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý chu trình ORC

3. Mô hình toán học

3.1. Energy hub

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

Khái niệm và cấu trúc của EH đã được giới thiệu ở nghiên cứu [16]; một cách tổng quát, EH được xem như một nút trong mạng lưới NL với nhiều đầu vào và đầu ra. Trong đó: P , L ký hiệu NL đầu vào, ra của các dạng NL tương ứng. Bản chất của EH là mô tả mối quan hệ chức năng giữa đầu vào/ra trong MEN. Ma trận ghép nối (1) có thể được sử dụng đại diện cho trạng thái ổn định lý tưởng của EH:

$$L = CP \quad (2)$$

Trong đó: L_i ($i = 1, 2, \dots, n$) là đầu ra của dạng NL thứ i ; P_j ($j = 1, 2, \dots, m$) là NL đầu vào thứ j ; c_{ij} là hệ số ghép nối, thường bao gồm hai phần: hệ số phân phối và hiệu suất. Khi các yếu tố phi tuyến xuất hiện, hệ số ghép c_{ij} không còn là một hằng số xác định nữa mà là một hàm của mức NL đầu vào, thời gian chạy, điều kiện môi trường và các yếu tố khác. Ma trận ghép nối (1) khi đó không phải là một hệ phương trình đại số tuyến tính đơn giản, và sẽ có sự thay đổi tương ứng với những thay đổi của điều kiện bên ngoài, nhưng hình thức vẫn tuân theo công thức trên và sẽ không ảnh hưởng nguyên lý tối ưu hóa và phương pháp giải nó. Nếu xét đến tác động của hệ thống lưu trữ NL (đầu ra của mô hình EH), gọi M là ma trận lưu trữ thì công thức 2 sẽ được viết như sau:

$$L + M = CP \quad (3)$$

Trong đó, ma trận M được xác định:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1} & s_{n2} & \dots & s_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong công thức (4) : E_i ($i = 1, 2, \dots, m$) là khả năng lưu trữ của NL thứ i ; s_{ij} là hệ số ghép nối tích trữ NL của ma trận S có tính đến các yếu tố như sự thay đổi trạng thái nạp/phóng điện và hiệu suất [19], từ đó ta có công thức tổng quát (5):

$$L = [C - S] \begin{bmatrix} P \\ E \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2. Microturbine (MT)

Tua bin khí siêu nhỏ (MT) là thiết bị quan trọng nhất để thực hiện chuyển đổi NL trong EH và nó cũng là nguồn điện chính trong MEN. Hiệu suất của nó bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như tải, nhiệt độ. Mô hình toán như sau:

$$\begin{cases} E_{MT} = P_{E,GT} \Delta_t \\ G_{MT} = \frac{E_{MT}}{\eta_{E,MT}} \\ Q_{re} = G_{MT} \eta_{Q,re} \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó, $P_{E,GT}$ là sản lượng điện của MT; G_{MT} là mức tiêu thụ khí; E_{MT} và Q_{re} lần lượt là sản lượng điện và nhiệt thải thu hồi của tuabin khí; $\eta_{E,MT}$ và η_Q lần lượt là hiệu suất biến đổi điện năng và hiệu suất thu hồi nhiệt tương ứng.

3.3. Mô hình toán của hệ thống phát điện nhiệt thải (nhiệt độ thấp) dựa trên ORC

Sản xuất nhiệt điện thải nhiệt độ thấp dựa trên ORC là một bổ sung quan trọng cho MT và nó cũng là một cách quan trọng để chuyển đổi nhiệt - điện, đóng một vai trò quan trọng trong việc sử dụng và chuyển đổi năng lượng. Mô hình toán:

$$\begin{cases} E_{ORC} = Q_{re1} \eta_{Q,re1} \\ Q_{re1} = Q_{re} \nu_{Q,re} \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó: E_{ORC} là NL điện đầu ra do phát điện ở nhiệt độ thấp dựa trên ORC; Q_{re1} là nhiệt năng đầu vào; $\eta_{Q,rel}$ là hiệu suất chuyển đổi nhiệt - điện và giá trị của nó liên quan đến nhiệt độ khí thải, chất lỏng làm việc v.v.; $\nu_{Q,re}$ là hệ số phân phối, giá trị của nó bằng tỷ số giữa nhiệt năng đầu vào ORC và nhiệt thải tuabin khí.

3.4. Gas boiler (nồi hơi gas)

Nhiệt lượng do lò hơi đốt gas sinh ra có liên quan đến hiệu suất của lò hơi:

$$Q_{GS} = G_{GS} \eta_{Q,GS} \quad (8)$$

Trong công thức (8): G_{GS} , Q_{GS} lần lượt là lượng khí tiêu thụ và nhiệt đầu ra của lò hơi; $\eta_{Q,GS}$ là hiệu suất nhiệt.

3.5. Pin năng lượng mặt trời PV

Giả thiết công suất chỉ phụ thuộc vào ánh sáng và nhiệt độ, ta có:

$$\begin{cases} E_{PV} = \frac{W_{PV}}{W_r} [1 + k_{T1} (T - T_r)] P_{E,PV} \Delta t \\ Q_{PV} = \frac{W_{PV}}{W} [1 + k_{T2} (T - T_r)] P_{Q,PV} \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó: E_{PV} và Q_{PV} lần lượt là công suất phát và nhiệt lượng của bộ thu NL mặt trời; W_r và W_r lần lượt là cường độ ánh sáng thực và cường độ ánh sáng tham chiếu; T và T_r lần lượt là nhiệt độ thực và nhiệt độ chuẩn; P_E , P_V và P_Q , P_V lần lượt là công suất quang điện và công suất thu NL mặt trời dưới cường độ ánh sáng chuẩn và nhiệt độ chuẩn; k_{T1} và k_{T2} là hệ số nhiệt độ.

3.6. Máy lạnh hấp thụ (HC)

Một phần nhiệt năng của hệ thống mô hình máy làm lạnh hấp thụ được cung cấp trực tiếp cho chất tải nhiệt và một phần chuyển thành nhiệt lạnh đáp ứng nhu cầu sử dụng và được điều chỉnh cùng với thiết bị lưu trữ nhiệt lạnh. Mô hình toán:

$$\begin{cases} Q_{HC} = Q_{AC} \eta_{Q,AC} \\ Q_{AC} = (Q_{re2} + Q_{PV} + Q_{GS}) \nu_{Q,AC} \\ Q_{re2} = (1 - \nu_{Q,AC}) Q_{re} \end{cases} \quad (10)$$

Trong đó: Q_{HC} Q_{AC} lần lượt là công suất làm lạnh đầu ra và nhiệt năng đầu vào của thiết bị làm lạnh hấp thụ; $\eta_{Q,AC}$ là hiệu suất chuyển đổi từ nhiệt sang làm lạnh; Q_{re2} là nhiệt dư của tuabin khí được loại bỏ khỏi phần phát điện; $\nu_{Q,AC}$ là hệ số phân phối.

3.7. Máy làm lạnh sử dụng điện năng

Thiết bị làm lạnh này cung cấp chủ yếu phụ thuộc vào tỷ lệ hiệu suất NL và kiểu máy của nó. Mô tả toán học như sau:

$$Q_{EC} = E_{COOL} \eta_{EC} \quad (11)$$

Q_{EC} là nhiệt lượng đầu ra; E_{COOL} và η_{EC} lần lượt là điện năng đầu vào và hiệu suất chuyển đổi của máy lạnh.

3.8. Hệ thống tích trữ

Các hệ thống lưu trữ giúp ổn định và điều hòa NL của mô hình MEN. Nghiên cứu này đề xuất sử dụng lưu trữ điện và nhiệt [19], chúng được mô tả như sau:

$$\begin{cases} E_{store}(k+1) = E_{store}(k)(1 - \mu_{E,IN}) + E_{IN} \mu_{E,IN} - \frac{E_{OUT}}{\eta_{E,OUT}} \\ Q_{store}(k+1) = Q_{store}(k)(1 - \mu_{Q,IN}) + Q_{IN} \mu_{Q,IN} - \frac{Q_{OUT}}{\eta_{Q,OUT}} \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó, $E_{store}(k)$ và $Q_{store}(k)$ lần lượt là điện năng và nhiệt năng tích trữ tại thời điểm k ; $\mu_{E,IN}$ và $\mu_{Q,IN}$ lần lượt là hệ số tổn thất khi lưu trữ điện và nhiệt khi lưu trữ; E_{IN} , E_{OUT} , Q_{IN} , Q_{OUT} lần lượt là NL tích điện, phóng điện, tích trữ nhiệt và tỏa nhiệt; $\eta_{E,IN}$, $\eta_{E,OUT}$, $\eta_{Q,IN}$, $\eta_{Q,OUT}$ tương ứng với hiệu suất Sạc/xả.

4. Vận hành tối ưu MEN

Trong MEN, các nguồn phân tán (gió, mặt trời...) dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố tự nhiên như thời tiết, nhiệt độ... dẫn đến rất khó kiểm soát công suất đầu ra. Các giải pháp thông thường là ưu tiên sử dụng và cố gắng khai thác chúng ở mức tối đa. Khí gas được sử dụng trong Turbine khí và nồi hơi thuộc năng lượng sạch, ít ô nhiễm hơn so với năng lượng hóa thạch truyền thống nên có thể coi là NL chính để đáp ứng nhu cầu tải. Trong bài báo này, giả định rằng MEN được kết nối với lưới điện nhưng năng lượng bên trong được sử dụng ưu tiên. Nhu cầu phát điện và phụ tải của NL tái tạo như gió và ánh sáng có thể được dự đoán dựa trên dữ liệu lịch sử, nhiệt, điện, nhu cầu tải khí để đạt được kế hoạch vận hành tốt nhất.

Hàm mục tiêu và các ràng buộc toán học như sau:

$$\begin{cases} \min y = F(x) = \min \{ [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \} \\ \text{s.t.} \quad x \in \Omega \\ \quad \quad G(x) = 0 \\ \quad \quad H(x) \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó: y là hàm mục tiêu; x là biến tối ưu hóa; Ω là không gian nghiệm; f_i là mục tiêu tối ưu hóa thứ i ; $G(x)$ và $H(x)$ lần lượt là các ràng buộc. Kết hợp với trung tâm ghép nối đa NL, các biến tối ưu hóa trong bài báo này là trạng thái hoạt động của tuabin khí vì mô và lưu trữ NL; và các mục tiêu tối ưu hóa lần lượt là các chỉ số kinh tế, chỉ số tiêu thụ NL và chỉ số môi trường.

4.1. Các chỉ số đánh giá

4.1.1. Chỉ số kinh tế

Chỉ số kinh tế [20] F_1 tính theo năm, chủ yếu bao gồm hệ thống chi phí lắp đặt C_{ins} , chi phí vận hành C_o và chi phí tiêu thụ NL C_{energy} :

$$F_1 = C_{ins} + C_{op} + C_{energy} \quad (14)$$

- Trong đó chi phí lắp đặt C_{ins} được xác định như sau:

$$C_{ins} = \sum_{i=1}^n N_i Y_i \frac{r}{1 - (1+r)^{-m_i}} \quad (15)$$

Trong công thức (15): n là số loại thiết bị; N_i là số đơn vị của thiết bị loại i ; Y_i là chi phí lắp đặt của thiết bị tương ứng thứ i ; r là hệ số chiết khấu, thường được lấy là 0,1; m_i là tuổi thọ sử dụng của thiết bị.

- Chi phí vận hành hệ thống C_o được tính như sau, trong đó: $O_{M,i}$ là chi phí vận hành của thiết bị thứ i ; $E_{i,h}$ là phụ tải theo giờ của thiết bị loại i :

$$C_{op} = \sum_{i=1}^n N_i O_{M,i} \sum_h E_{i,h} \quad (16)$$

- Chi phí tiêu thụ NL: $C_{energy} = \sum_h V_{gas,h} p_{gas} + C_{ele}$ (17)

Trong đó: $V_{gas,h}$ là lượng khí tiêu thụ hàng giờ của thiết bị; p_{gas} là giá khí đốt tự nhiên; C_{ele} là chi phí mua điện từ lưới điện lớn.

4.1.2. Chỉ số tiêu thụ NL

Mức tiêu thụ NL sơ cấp là NL tiêu thụ sơ cấp tương ứng với mức tiêu thụ khí đốt tự nhiên của hệ thống và điện năng được mua. Tỷ lệ sử dụng NL sơ cấp là tỷ lệ giữa tổng NL đầu ra của hệ thống trên tổng NL tiêu thụ sơ cấp. Tỷ lệ sử dụng NL sơ cấp càng cao thì hiệu quả tiết kiệm NL của hệ thống càng tốt. Trong bài báo này, tiêu thụ NL sơ cấp F_2 được sử dụng làm chỉ số tiêu thụ NL:

$$F_2 = E_{grid} \sigma_e + G_{IN} \sigma_f \quad (18)$$

Với E_{grid} là điện năng mua từ lưới điện lớn; G_{IN} là đầu vào của khí gas; σ_e và σ_f lần lượt là hệ số chuyển đổi của điện năng mua từ lưới điện và năng lượng sơ cấp tương ứng.

4.1.3. Các chỉ số môi trường

Các chỉ tiêu môi trường của hệ thống lưới năng lượng vì mô chủ yếu bao gồm hai phần: phát thải Carbon và phát thải Nitơ, trong bài báo này, phát thải Carbon được sử dụng để đại diện cho chỉ tiêu môi trường F_3 :

$$F_3 = E_{grid} \mu_{e,C} + G_{IN} \mu_{t,C} \quad (19)$$

Với $\mu_{e,C}$ và $\mu_{t,C}$ lần lượt là hệ số phát thải Cacbon tương ứng của điện lưới và mạng khí Gas.

4.2. Các ràng buộc

Ngoài các ràng buộc theo biểu thức toán học từ (6) đến (12), mô hình toán cần đáp ứng các ràng buộc sau:

4.2.1. Cân bằng tải NL

$$E_N = E_{Grid} + \sum_{i=1}^n E_{DG,i} \quad (20)$$

$$Q_L = \sum_{i=1}^n Q_{DG,i} \quad (21)$$

Trong đó: $E_{DG,i}$ là NL điện được cung cấp bởi thiết bị phân phối thứ i ; Q_L là tổng của tải làm mát và sưởi ấm; $Q_{DG,i}$ là NL làm mát và sưởi ấm do thiết bị phân phối thứ i cung cấp.

4.2.2. Công suất giới hạn của hệ thống

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (22)$$

Trong công thức: $P_{i,\min}$ và $P_{i,\max}$ lần lượt là công suất đầu ra min và max của dạng NL phân bố cấp thứ i ; P_i là công suất đầu ra thực tế của NL phân bố cấp i .

4.2.3. Giới hạn hệ thống tích trữ

$$P_{store,\min} \leq P_{store}^t \leq P_{store,\max} \quad (23)$$

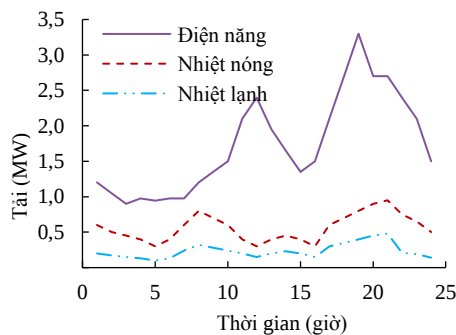
$$P_{b,\min} \leq P_b^t \leq P_{b,\max} \quad (24)$$

Trong công thức: P_{store}^t và P_b^t tương ứng là dung lượng lưu trữ và công suất sạc và xả của thiết bị tại thời điểm t bất kỳ; $P_{store,\min}$ và $P_{store,\max}$ lần lượt là dung lượng tối thiểu và tối đa của thiết bị lưu trữ NL; $P_{b,\min}$ và $P_{b,\max}$ lần lượt là công suất sạc và xả tối thiểu và tối đa của thiết bị.

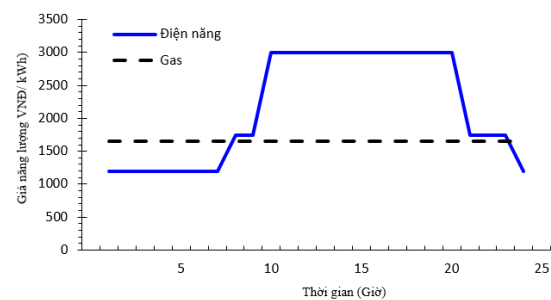
5. Kết quả tính toán

5.1. Dữ liệu tính toán

Dữ liệu phụ tải của một tòa nhà giả định được sử dụng để áp dụng mô hình MEN, diện tích tòa nhà là 5000 m² và vùng phủ sóng điều hòa không khí là 4423 m². Phần mềm mô phỏng mức tiêu thụ NL của tòa nhà được sử dụng để lấy dữ liệu làm mát, sưởi ấm và tiêu thụ điện hàng năm. Do thông tin tiêu thụ năng lượng của các tòa nhà trung tâm mua sắm trong cùng một mùa thay đổi tương đối ít, vì vậy để đơn giản hóa việc tính toán, thông tin tiêu thụ năng lượng của các ngày điển hình trong mỗi quý được chọn làm tham chiếu, xét trong 24 giờ một ngày. Biểu đồ phụ tải được tham chiếu hình 4; biểu giá năng lượng tham chiếu hình 5 [21].



Hình 4. Nhu cầu tiêu thụ năng lượng



Hình 5. Biểu giá năng lượng

Để đơn giản hóa trong tính toán và làm nổi bật những ưu điểm của công nghệ ORC, một số giả thiết được đề cập: Vì nhu cầu tải nhiệt trong trường hợp này nhỏ hơn nhiều so với tải làm mát và tải điện, nên liên kết lưu trữ nhiệt và lò hơi nhiệt thải được bỏ qua trong trường hợp này; phong điện không được xem xét trong ví dụ này, nhưng trong trường hợp nếu có, mô hình điện gió có thể được kết nối với EH để vận hành; tất cả năng lượng mặt trời được sử dụng để phát điện...

Dựa trên dữ liệu làm mát, sưởi ấm và tải điện, công suất tải tối đa của hệ thống là 279kW. Do đó, công suất phát điện tối đa của MT trong mạng vì năng lượng được đặt 200 kW, công suất định mức của PV là 100 kW, công suất tối đa ORC là 35 kW.

5.2. Kết quả tính

Thuật toán PSO được lựa chọn trong nghiên cứu này (MATLAB) để giải quyết vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu vận hành MEN. Theo thông tin tham số thiết bị ở trên, đặt số hạt m là 100 và số lần lặp là 1000. Kết quả tính toán cho ở bảng 1:

Bảng 1. So sánh các chỉ số năng lượng

Loại hình	Tiêu thụ NL sơ cấp/ MWh	% NL sử dụng	Phát thải carbon/Kg
Lưới điện truyền thống	2553,7	56,8	168500
MEN ko có ORC	1714,1	84,6	113100
MEN có ORC	1658,3	87,5	109200

Có thể thấy từ Bảng 1, tiêu thụ NL sơ cấp của MEN giảm 35,1% so với lưới điện truyền thống và tỷ lệ sử dụng NL tăng 30,7%; trong cùng điều kiện, nhiệt tổng hợp và phát điện không sử dụng công nghệ phát nhiệt thải ORC, tỷ lệ sử dụng NL của hệ thống cũng thấp hơn 2,9% so với hệ thống MEN có phát nhiệt thải ORC. Nó cho thấy hệ thống MEN đề xuất vượt trội hơn nhiều so với hệ thống truyền thống về tiêu thụ năng lượng sơ cấp và sử dụng năng lượng.

Trường hợp phụ tải được đáp ứng từ lưới điện truyền thống, các chỉ số tối ưu được so sánh ở bảng 2 cho thấy chi phí kinh tế của MEN đề xuất giảm thấp. Nguyên nhân chính là do có sự bổ sung của thiết bị phát nhiệt thải ORC.

Bảng 2. So sánh các chỉ số kinh tế

Loại hình	Chi phí đầu tư (10 ⁶ VNĐ)	Chi phí NL tiêu thụ (10 ⁶ VNĐ /ngày)	Chi phí phát thải (10 ⁶ VNĐ /ngày)
MG	47560	2600	26
MEN	34584	1980	16

Phát thải Carbon là một trong những chỉ số quan trọng để đánh giá mức độ thân thiện với môi trường. Dữ liệu trong Bảng 1 cho thấy mức phát thải carbon của MEN thấp hơn 35,2% so với hệ thống lưới điện truyền thống và là 3%; thấp hơn so với hệ thống lưới vì mô không phát nhiệt thải ORC 5%. MEN sử dụng năng lượng mặt trời và khí tự nhiên làm năng lượng sơ cấp chính, giúp giảm tổng lượng khí thải Carbon và có thể giảm nhẹ tốt hơn các vấn đề môi trường hiện nay như hiệu ứng nhà kính.

6. Kết luận

Trên cơ sở mô hình CCHP, bài báo này đã đề xuất xây dựng mô hình EH có xét đến hệ thống phát nhiệt thải thấp ORC nhằm đáp ứng đồng thời ba mục tiêu tối ưu của hệ thống gồm: chi phí đầu tư thiết bị, chi phí sử dụng năng lượng và môi trường. Theo nhu cầu phụ tải điện hình hàng ngày trong bốn mùa, thuật toán PSO được sử dụng để giải quyết chiến lược vận hành máy phát và lưu trữ năng lượng, đồng thời thu được chỉ số tối ưu của hệ thống. Kết quả tính toán được so sánh với lưới điện truyền thống đã cho thấy chi phí vận hành của MEN đem lại hiệu quả tốt hơn so với lưới điện truyền thống; điều này giúp cho việc đặt nền tảng xây dựng Internet năng lượng trong tương lai thêm cơ sở vững chắc. Kết quả phân tích tính toán cho thấy, trong quá trình biến đổi NL, tốc độ phản ứng của NL điện và nhiệt năng là khá khác nhau. Do đó cần có thêm

những nghiên cứu chuyên sâu về vấn đề này để hoàn thiện hơn trong quá trình đưa mô hình MEN vào thực tiễn sử dụng.

Lời cảm ơn

Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH cấp cơ sở, mã số **T2022-07-12** do Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – Đại học Thái Nguyên cấp kinh phí, năm 2022.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Rifkin, *The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world*. New York: Palgrave MacMillan, 2011.
- [2] J. Hongjie, W. Dan, and X. Xiadong, *et al.*, "Research on some key problems related to integrated energy systems," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 39, no. 7, pp. 198-207, 2015.
- [3] K. Sun *et al.*, "Provincial regional Energy Internet framework and development tendency analysis," *Power System Protection and Control*, vol. 45, no. 3, pp. 1-9, 2017.
- [4] Y. Wang, N. Zhang, and C. Kang, "Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet," *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2015.
- [5] M. Xu, N. Tai, and W. Huang, "Energy router design based on community energy network," *Power System Protection and Control*, vol. 44, no. 23, pp. 177-183, 2016.
- [6] T. Ma, J. Wu, and L. Hao, "Energy flow calculation and integrated simulation of micro-energy grid with combined cooling, heating and power," *Automation of electric power systems*, vol. 40, no. 23, pp. 22-27, 2016.
- [7] T.T. Ha, Y. Zhang *et al.*, "Energy EH modeling to minimize residential energy costs considering solar energy and BESS," *J. Mod Power Syst Clean Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 389-399, 2017.
- [8] X. D. Xue *et al.*, "Micro energy network design for community based on compressed air energy storage," *Proc CSEE*, vol. 36, pp. 12, pp. 1-7, 2016.
- [9] M. Geidl and G. Andersson, "A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow," *Power Tech IEEE*, St. Petersburg, Russia, 27-30 June 2005, pp. 1-7.
- [10] Z. Chen *et al.*, "Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system," *Proceedings of the CSEE*, vol. 37, no. 11, pp. 3067-3077, 2017.
- [11] M. Arnold, R. Negenborn, and G. Andersson, "Distributed Predictive Control for Energy EH Coordination in Coupled Electricity and Gas Networks," *Int Syst Cont Auto Sci Engin*, vol. 42, pp. 235-273, 2010.
- [12] X. Zhao *et al.*, "An improved energy flow calculation method for integrated electricity and natural gas system," *Transactions of China electrotechnical society*, vol. 33, no. 3, pp. 467-477, 2018.
- [13] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "Home load management in a residential energy EH," *Elect Power syst res*, vol. 119, pp. 322-328, 2015.
- [14] X. W. Shen, Y. D. Han, and S. Z. Zhu, "Comprehensive power-supply planning for active distribution system considering cooling, heating and power load balance," *J. Mod Power Syst Clean Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 485-493, 2015.
- [15] M. X. Liu, Y. G. Shi, and F. Fang, "Combined cooling, heating and power systems," *Renew and Sustain Energy Rev.*, vol. 35, pp. 1-22, 2014.
- [16] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadiivatlou, "Energy EH: From a model to a concept – A review," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 1512-1527, 2017.
- [17] S. Pazouki, M. R. Haghifam, and A. Moser, "Uncertainty modeling in optimal operation of energy EH in presence of wind, storage and demand response," *Int J Electr Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 335-345, 2014.
- [18] T. D. Hoang and A. N. Hoang, "Study on heat pump with refrigerant system using organic rankine cycle process," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 13-17, 2019.
- [19] A. Sheikhi, B. Shahab, and A. M. Ranjbar, "An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs," *Energy*, vol. 89, pp. 490-499, 2015.
- [20] L. Saarinen, "Modelling and control of a district heating system," M.Sc. thesis, Department of Information Technology, Uppsala University, Mar. 2008.
- [21] T. H. A. Pham and T. N. D. Pham, "Research influences the structure to the operation of the energy hub," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 200, no. 07, pp. 55 -62, 2019.