Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Phần A: Khoa học tự nhiên, Công nghệ và Môi trường
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2024.418

ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ SONG SINH SỐ TRONG PHÁT TRIỂN LƯỚI ĐIỆN THÔNG MINH – KHẢO SÁT CHO LƯỚI ĐIỆN CỦA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Trần Ngọc Huy Thịnh[1*] và Lâm Hoàng Cát Tiên[2]
[1]Khoa Kỹ thuật – Công nghệ, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Việt Nam
[2]Khoa Điện – Điện tử, Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): tnhthinh@ntt.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 14/03/2024
Sửa bài (Revised): 06/06/2024
Duyệt đăng (Accepted): 24/07/2024

Title: *Application of digital twin technology in smart grid development for Ho Chi Minh City's power grid*

Author(s): *Tran Ngoc Huy Thinh[1*] and Lam Hoang Cat Tien[2]*

Affiliation(s): *[1]Faculty of Engineering and Technology, Nguyen Tat Thanh University, Ho Chi Minh City, Viet Nam; [2]Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Cao Thang Technical College, Ho Chi Minh City, Viet Nam*

TÓM TẮT

Bản sao kỹ thuật số, thường được gọi là công nghệ song sinh số (digital twin technology-DTT), là bản sao của một đối tượng thực tế được tạo bằng kỹ thuật số. Các luồng dữ liệu thu thập từ các cảm biến gắn vào đối tượng thực tế ban đầu đã được sử dụng để tạo ra một bản sao trong môi trường ảo và có thể hiển thị tình trạng của thiết bị thực. Công nghệ này đã được nghiên cứu kỹ lưỡng ở nhiều quốc gia trên thế giới và được sử dụng rộng rãi trong sản xuất. Tuy nhiên, ý tưởng về song sinh số (digital twin-DT) vẫn chưa phổ biến ở Việt Nam, đặc biệt là khi nói đến tự động hóa lưới điện phân phối (distribution grid-DG). Các đặc tính của DTT được ứng dụng để phát triển lưới điện thông minh (smart grid-SG) cho DG được thảo luận trong nghiên cứu này. Bài báo này trình bày những hạn chế và ưu điểm sẵn có về cơ sở hạ tầng lưới điện và hạ tầng công nghệ thông tin ở thành phố Hồ Chí Minh nhằm ứng dụng DTT cho phát triển SG.

Từ khóa: *Lưới điện phân phối, lưới điện thông minh, phát triển lưới điện, song sinh số, tối ưu hóa lưới điện*

ABSTRACT

A digital twin (DT), usually referred to as digital twin technology (DTT), is a replica of an actual object made digitally. Data streams gathered from sensors attached to the original object were used to produce this duplicate. This technology has been thoroughly studied in numerous nations across the world. It is widely used in manufacturing, including for process optimization, quality control on production lines, supply chain management, preventive maintenance, and customer experience research. However, the idea of the digital twin is still not very common in Vietnam, particularly when it comes to the automation of the power distribution grid (DG). The qualities of DTT that must be included for creating a smart grid (SG) for DG are discussed in this study. To fulfil the growing need for power grid development, the paper also discusses the infrastructural constraints in Ho Chi Minh City while creating a smart power grid based on DTT.

Keywords: *Power grid optimization, digital twin, distribution grid, grid development, smart grid*

1. GIỚI THIỆU

Lưới điện phân phối trên địa bàn thành phố Hồ Chí Minh phát triển nhanh từ năm 2019 đến năm 2022 nhằm đáp ứng kịp thời nhu cầu tiêu thụ điện và phục vụ phát triển kinh tế, chính trị. Đặc biệt với sự bùng nổ lắp đặt hệ thống điện mặt trời áp mái đấu nối vào lưới điện đã khiến lưới điện vận hành không ổn định. Việc vận hành hệ thống điện cũng gặp nhiều khó khăn khi các nguồn điện mặt trời có đặc thù là công suất dư lớn và cung cấp lên lưới trong giờ thấp điểm nhưng đột ngột ngừng cung cấp vào giờ cao điểm khi nhu cầu điện rất cao. Lưới điện được kết nối trực tiếp với người dùng. Chất lượng và độ tin cậy của nguồn điện ảnh hưởng trực tiếp đến trải nghiệm người dùng. Nếu lưới điện không được bảo trì đúng lúc, người dùng ngay lập tức bị mất điện.

Những thách thức ngày càng tăng do biến đổi khí hậu và nhu cầu năng lượng ngày càng đòi hỏi hệ thống năng lượng hiện tại phải nhanh chóng chuyển đổi. Quá trình chuyển đổi phải giải quyết nhu cầu cấp thiết về tính bền vững trong khi đảm bảo rằng sự phát triển xã hội không bị tổn hại. Do đó, những thay đổi được yêu cầu ở tất cả các cấp của hệ thống điện, chẳng hạn như sản xuất, truyền tải, chuyển đổi, lưu trữ và tiêu thụ. Ngoài tính khả thi về kinh tế, những thách thức kỹ thuật chính là hiệu quả và sự ổn định của hệ thống năng lượng phân tán trong tương lai, mà xương sống sẽ là lưới điện.

Sự gia tăng các nguồn năng lượng tái tạo dẫn đến lưới điện phải kết nối với rất nhiều nguồn năng lượng phân tán và việc quản lý vận hành hệ thống điện rất phức tạp (Nehrir et al., 2011). Một khó khăn khác nữa chính là sự phức tạp trong vận hành tăng lên bởi người sử dụng điện phát điện trở lại lưới điện từ các nguồn phát như nguồn điện mặt trời áp mái (Panteli & Mancarella, 2015; Marot et al., 2022).

Các hệ thống điện trong tương lai sẽ phải linh hoạt, năng động, đòi hỏi phải ứng dụng công nghệ trí tuệ nhân tạo để có thể đưa ra quyết định vận hành hệ thống điện thay thế con người (Hunt et al., 2019). Nền công nghiệp 4.0 đang được thúc đẩy bởi các công nghệ tiên tiến như vạn vật kết nối, trí tuệ nhân tạo và điện toán đám mây, đang mở ra một loạt các cơ hội và cho phép thay đổi mô hình vận hành trong lĩnh vực năng lượng (Kroposki et al., 2020; Borowski, 2021; Thinh et al., 2023). DT (Digital twin) là một kỹ thuật khả thi để áp dụng nhằm xây dựng các hệ thống điện thông minh. DTT (digital twin technology) trước đây được phát triển cho các ứng dụng hàng không vũ trụ và sản xuất, rất hữu ích khi kết hợp các dịch vụ dựa trên các quan sát và dự báo của hệ thống trong thế giới thực.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về ứng dụng DTT nhưng hầu hết các giải pháp hoặc cách tiếp cận chỉ được trình bày theo khái niệm. DT trong hệ thống điện vẫn đang trong giai đoạn phát triển ban đầu và chưa hoàn thiện. Ví dụ một thiết kế tiềm năng của DT được đề xuất để kết hợp nhiều mô hình ứng dụng cụ thể cho các hệ thống điện (Ahmadi, 2021) và khái niệm DT cho lưới điện siêu nhỏ. Một số nghiên cứu tổng hợp các đặc điểm về cấu trúc và hoạt động của hệ thống điện trong tương lai gồm các yêu cầu của DT được áp dụng trong hệ thống điện nhưng vẫn còn nhiều hạn chế (Pan et al., 2020; Bazmohammadi et al., 2022; Arraño-Vargas & Konstantinou, 2023; Song et al., 2023).

Đóng góp của bài báo này bao gồm:

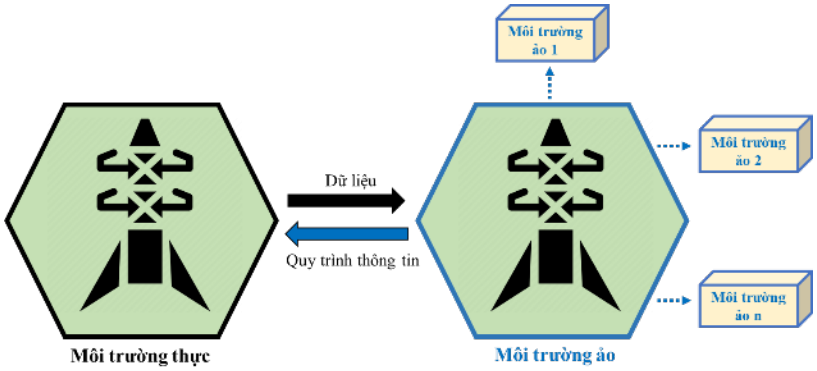
- Nghiên cứu trình bày khái niệm, đặc điểm và kiến trúc của DTT cho phát triển DG (distribution grid) và SG (smart grid).
- Phân tích động lực ứng dụng DTT vào hệ thống điện phân phối trong tương lai.
- Trình bày các yêu cầu về công nghệ và cơ sở hạ tầng để phát triển lưới điện dựa trên DTT.
- Phân tích những thuận lợi và thách thức về địa lý, hạ tầng lưới điện hiện có, hạ tầng công nghệ thông tin của thành phố Hồ Chí Minh khi áp dụng DTT trong phát triển SG.

2. CÔNG NGHỆ SONG SINH SỐ

2.1. Khái niệm về công nghệ song sinh số

Grieves and Vickers đã trình bày ba thành phần chính của mô hình DTT gồm:

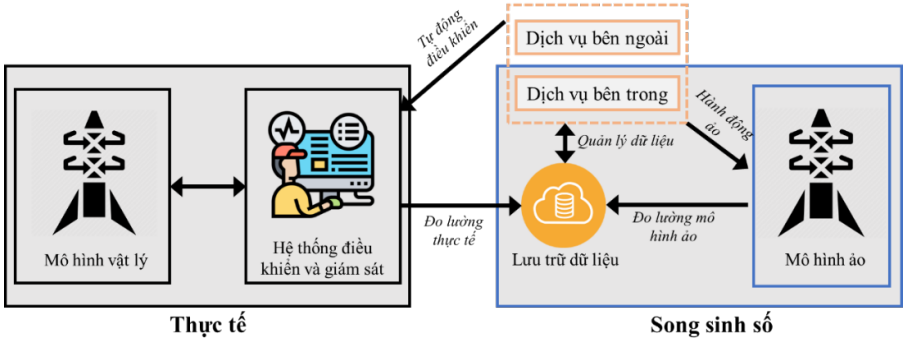
- Một đối tượng thực tế trong thế giới thực.
- Một đối tượng ảo trong thế giới ảo.
- Liên kết thông tin từ không gian ảo sang không gian ảo và từ không gian ảo sang không gian thực. Thành phần cuối cùng là công cụ hỗ trợ trao đổi dữ liệu, cho phép hội tụ và đồng bộ hóa các hệ thống ảo và vật lý với nhau. Hình 1 mô tả cấu trúc cơ bản của công nghệ song sinh số.



Hình 1. Một mô hình ảo và một mô hình thực trong DTT (Grieves & Vickers, 2017)

DT tồn tại dưới dạng kỹ thuật số song song với một đối tượng vật lý thực tế. Mô hình ảo, dữ liệu và dịch vụ tạo thành ba phần được kết nối với nhau. Hệ thống DT có thể tự điều chỉnh và cấu hình lại để phản ánh trạng thái thực tế của thực thể vật lý trong suốt quy trình hoạt động. DT cung cấp các dữ liệu liên tục để nâng cao hoặc mở rộng hiệu suất và khả năng của đối tượng vật lý thực tế. Nguyên tắc hoạt động và trao đổi dữ liệu giữa các mô hình ảo và mô hình thực tế được mô tả trong Hình 2. Mũi tên đơn hướng hoặc hai chiều được sử dụng để chỉ ra các chiều trao đổi dữ liệu.

Một nghiên cứu điển hình về ứng dụng DT cho một mô hình tua bin gió được trình bày cho thấy hiệu quả của phương pháp mới được đề xuất (Tao et al., 2018). Trong nghiên cứu này, một mô hình DT năm chiều cho một thiết bị phức tạp là tua bia gió được ứng dụng DDT cho hệ thống điều khiển, giám sát và trao đổi dữ liệu liên tục được xây dựng. Các cảm biến thu thập tín hiệu của đối tượng vật lý được đưa đến bộ lưu trữ dữ liệu liên tục. Sự trao đổi dữ liệu liên tục của thiết bị vật lý giúp người vận hành giám sát được tình trạng của thiết bị một cách trực quan dựa trên bản DT được mô hình hóa. Dựa trên sự thay đổi của đối tượng vật lý bên ngoài thì bản DT tự động cập nhật để phản ánh kịp thời đồng thời đưa ra các lựa chọn điều khiển dựa vào các kịch bản đã được cung cấp sẵn hoặc hoàn toàn tự động dựa vào trí tuệ nhân tạo.



Hình 2. Nguyên tắc hoạt động và trao đổi dữ liệu giữa các mô hình ảo và mô hình thực trong DTT

2.2. Động lực áp dụng công nghệ song sinh số trong hệ thống điện

Hệ thống điện trong tương lai sẽ thay đổi phương thức vận hành rất nhiều vì sự thâm nhập ngày càng tăng của các nguồn năng lượng tái tạo phân tán. Lưới điện sẽ trải qua những sự gián đoạn ngẫu nhiên do không thể đoán trước được sự xâm nhập các nguồn năng lượng tái tạo. Một nguyên nhân khác nữa chính là việc lắp đặt các bộ chuyển đổi điện tử công suất làm thay đổi đặc tính của lưới điện (Liu, et al., 2016; Sajadi et al., 2019). Ngoài ra, tác nhân làm mất ổn định hệ thống điện có thể đến từ các máy phát điện đồng bộ bị hỏng, lượng quán tính có sẵn trong hệ thống giảm nhanh chóng, gây nguy hiểm cho sự ổn định của lưới điện khi năng lượng dự trữ biến mất.

Về nâng cao hiệu quả vận hành dựa trên DDT, nhóm tác giả đang làm việc tại Viện Nghiên cứu Điện lực Trung Quốc đã thực hiện một nghiên cứu ứng dụng DDT trong thu thập và phân tích dữ liệu

của một mạng điện thuộc lưới điện Trung Quốc với 40 nghìn nút đã được mô hình hóa (Zhou et al., 2019). Kết quả từ nghiên cứu này cho thấy rằng sau khi ứng dụng DDT đã giảm thời gian phản hồi của hệ thống phân tích trực tuyến từ lúc thu thập dữ liệu đến phân tích hoàn chỉnh chỉ còn 60 giây so với trước đây là 10 phút. Một nền tảng quản lý sử dụng DDT để thực hiện phân tích mô hình kinh tế kỹ thuật nhà máy nhiệt điện than của Viện Năng lượng Trung Quốc cho thấy đã cải thiện hiệu suất vận hành của tổ máy và giảm mức tiêu thụ than phát điện lên tới 3,5 g/kWh số than tiêu chuẩn (Xu et al., 2019). General Electronics (GE) đã thành công trong việc tạo ra DT của toàn bộ trang trại gió. DT của tuabin gió giúp tăng sản lượng năng lượng, tối ưu hóa các chiến lược bảo trì cũng như cải thiện độ tin cậy bằng cách thu thập dữ liệu thời gian thực như báo cáo thời tiết, dịch vụ và hiệu suất, cùng nhiều dữ liệu khác (GE, 2021b). Tương tự, DNV GL, một công ty cung cấp các dịch vụ thử nghiệm, chứng nhận và tư vấn cho ngành điện và năng lượng tái tạo đã phát triển một công cụ phân tích DT có tên WindGEMINI cho các tuabin gió, giúp cải thiện hiệu suất của trang trại gió bằng cách cung cấp dịch vụ bảo trì dự đoán. Hệ thống này đã phát hiện vết nứt trên cánh tuabin vào năm 2019, giúp tránh thất thoát 5000 USD (DNVGL, 2021a), một bộ phận bị lỗi trong hộp số làm giảm hiệu suất 6% đã được phát hiện, từ đó đã kịp thời xử lý. Khi sử dụng WindGEMINI, người ta phát hiện ra rằng ngay cả việc giảm nhỏ 2% hiệu suất đường cong công suất cũng có thể tiết kiệm 80.000 USD trong suốt vòng đời của tuabin (DNVGL, 2021b). Những lợi ích của DT, chẳng hạn như giám sát và bảo trì từ xa đã được các ngành công nghiệp nhận ra. Các công ty như GE đã tiết kiệm được 1,5 tỷ USD nhờ khả năng giám sát thời gian thực của DT, dẫn đến tiết kiệm chi phí vận hành và bảo trì (GE, 2021a). Những hiệu quả trên cho thấy rằng việc ứng dụng DDT trong lĩnh vực vận hành lưới điện là rất cần thiết với tình hình nước ta hiện nay khi có quá nhiều sự xâm nhập của các nguồn năng lượng tái tạo.

2.3. Những nghiên cứu liên quan đến việc áp dụng công nghệ song sinh số vào phát triển lưới điện

Bảng 1 trình bày các nghiên cứu gần đây liên quan đến ứng dụng DTT cho lưới điện. Các ý tưởng của các nghiên cứu này như phân tích dữ liệu trực tuyến và thu thập dữ liệu theo thời gian thực, điều khiển tự động, hệ thống nền tảng dựa trên đám mây, điều phối lưới điện, hệ thống truyền thông từ đối tượng vật lý đến DT, tối ưu hóa lưới điện. Các hệ thống điều khiển, giám sát và thu thập dữ liệu cùng với đối tượng ảo song sinh, an ninh mạng được kiểm soát, trao đổi dữ liệu bằng vạn vật kết nối, phân tích dữ liệu lớn, học máy, học sâu, chuỗi khối, mạng thần kinh nhân tạo. Trong tất cả các nghiên cứu này, ý tưởng về ứng dụng của DT đã được đưa ra như một giải pháp khả thi cho những lo ngại mà sự phức tạp của lưới điện cần phải có trong tương lai khi mà có sự kết nối nhiều nguồn điện tái tạo vào lưới điện. Bằng cách đạt được độ chính xác cao 96-98%, các phương pháp tiếp cận được đề xuất đều có tỷ lệ thành công đáng kể.

Bảng 1. Những nghiên cứu liên quan đến ứng dụng DTT cho phát triển lưới điện

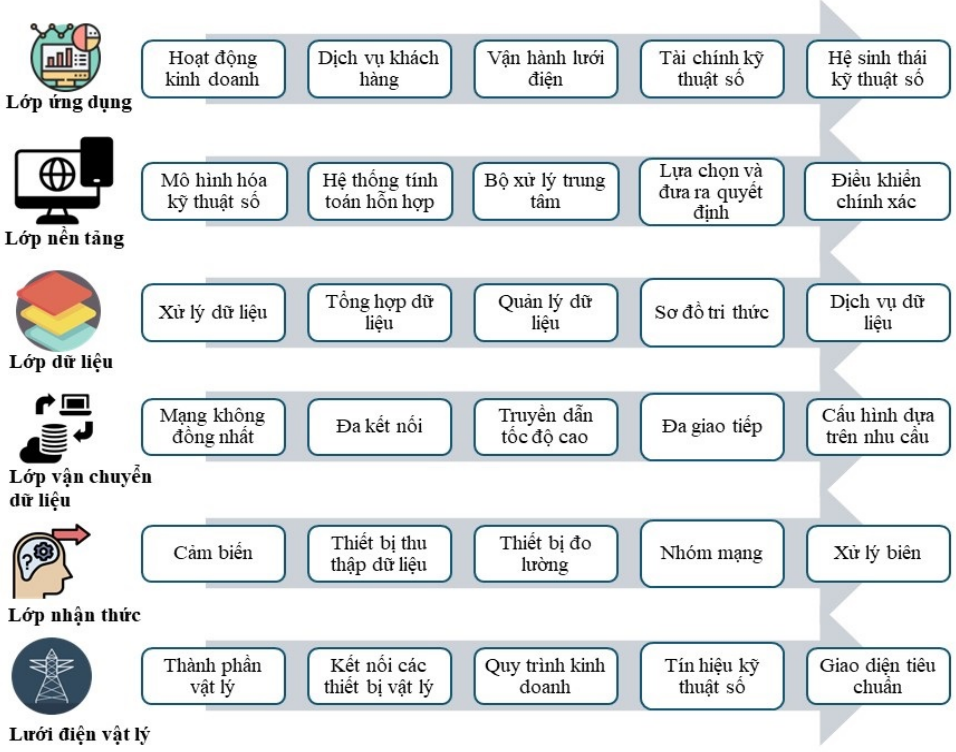
Tham khảo	Phương pháp luận	Nền tảng	Kết quả	Thách thức
(Jiang et al., 2022)	Trình bày một cấu trúc của DT trong SG	Máy biến áp trong lưới điện 35 kV	Quản lý SG và ra quyết định dựa trên DT	Sự phức tạp của phân tích thời gian thực quy mô lớn
(Zhou et al., 2019)	Kiến trúc mới để phân tích trực tuyến	Phân tích và gửi thông tin lưới điện	Phân tích và số hóa dữ liệu quy mô lớn	Sự phức tạp của phân tích dữ liệu thời gian thực
(Mourtzis, et al., 2022)	Phân phối và tối ưu hóa nguồn điện bằng DTT	Phân phối điện thông minh trong khuôn viên trường đại học	Phân phối năng lượng thông minh và kết nối khách hàng/ nhà sản xuất thông qua nền tảng đám mây	Cần khảo sát thêm
(Qian et al., 2022)	Kiến trúc DT dựa trên vạn vật kết nối	Bản sao kỹ thuật số của đối vật lý	Sản xuất và vận chuyển sáng tạo	Những thách thức với an ninh mạng
(Kandasamy, et al., 2022)	An ninh mạng cho DTT	Hệ thống điện cho nhà thông minh	An ninh lưới điện có giá cả phải chăng và hấp dẫn	Thử nghiệm vật lý và DT có sự khác biệt tương đối

Tham khảo	Phương pháp luận	Nền tảng	Kết quả	Thách thức
(Darbali-Zamora et al., 2021)	Tối ưu hóa DT thời gian thực	Công nghệ biến tần cho tấm pin năng lượng mặt trời	Tối ưu hóa và giám sát chất lượng cao với bảo mật	Phân phối điện không cân bằng có thể xảy ra
(Saad et al., 2020)	Xác thực an ninh mạng cho hệ thống DT	Dịch vụ web từ Amazon	Nền tảng mạng bảo mật cao, quản lý vật thể vật lý	So sánh, các hệ thống băng thông thấp có sai số bình phương trung bình cao hơn các hệ thống băng thông cao

Các nghiên cứu về DTT trong Bảng 1 đã cho thấy nhiều hứa hẹn trong lĩnh vực quản lý lưới điện. Kết quả của nghiên cứu này bao gồm: quản lý và ra quyết định cho SG, phân tích và số hóa dữ liệu quy mô lớn, phân phối năng lượng thông minh và kết nối khách hàng/nhà sản xuất thông qua đám mây, sản xuất và vận chuyển sáng tạo, bảo mật lưới điện có giá cả phải chăng và hấp dẫn, tối ưu hóa và giám sát chất lượng cao với bảo mật và nền tảng mạng bảo mật cao, quản lý vật thể vật lý (băng thông cao và thấp). DTT cũng đã nhấn mạnh tiềm năng của các hệ thống năng lượng tái tạo. Tuy nhiên, các nghiên cứu này cũng đưa ra một số thách thức trong việc thực hiện ứng dụng DTT trong lưới điện. Những thách thức này bao gồm sự phức tạp của phân tích thời gian thực quy mô lớn, sự phức tạp của phân tích dữ liệu thời gian thực, thách thức với an ninh mạng, thử nghiệm vật lý và DT có sự khác biệt tương đối. Bất chấp những thách thức này, nghiên cứu về DTT trong lưới điện tiếp tục cho thấy tiềm năng lớn để cải thiện hiệu quả và an ninh của hệ thống điện.

2.4. Đặc tính và cấu trúc của lưới điện kỹ thuật số dựa trên công nghệ song sinh số

Lưới điện kỹ thuật số ứng dụng công nghệ song sinh số gồm có 3 đặc tính chính sau đây (Bai & Wang, 2022):



Hình 3. Kiến trúc cơ bản của lưới điện kỹ thuật số dựa trên bản song sinh số (Bai & Wang, 2022)

(1) Đặc tính vật lý: Lưới điện kỹ thuật số là sự kết hợp giữa hệ thống điện truyền thống và công nghệ kỹ thuật số tiên tiến, tạo nên một mô hình điện năng hiện đại và thông minh hơn. Các dữ liệu và thông tin khác nhau được tạo ra bởi lưới điện vật lý trong quá trình truyền tải điện và cơ sở hạ tầng của nó tạo thành nền tảng của lưới điện kỹ thuật số.

(2) Đặc tính kỹ thuật: Công nghệ bản sao kỹ thuật số giúp xây dựng một bản sao lưới điện kỹ thuật tương ứng với lưới điện vật lý và quy trình sản xuất. Các thông tin của bản sao kỹ thuật số sẽ tái tạo giá trị của lưới điện vật lý cũng như tính tự chủ và tối ưu hóa thông qua sự phối hợp song song giữa lưới điện vật lý và bản sao lưới điện kỹ thuật số.

(3) Đặc tính giá trị: Lưới điện kỹ thuật số sử dụng dữ liệu làm yếu tố sản xuất cốt lõi để cải thiện năng suất, giải phóng và nâng cao năng suất lao động của con người và năng lực hoạt động của thiết bị. Các luồng dữ liệu góp phần tối ưu hóa các khâu quản lý, điều khiển và giám sát thông qua các công cụ được hỗ trợ bởi trí tuệ nhân tạo. Để đạt được các yêu cầu trong việc phát triển một lưới điện kỹ thuật số dựa trên công nghệ bản sao số, lưới điện kỹ thuật số phải đáp ứng các yêu cầu được trình bày trong Hình 3.

2.5. Khả năng đáp ứng của lưới điện thành phố Hồ Chí Minh để ứng dụng công nghệ song sinh số cho phát triển lưới điện thông minh

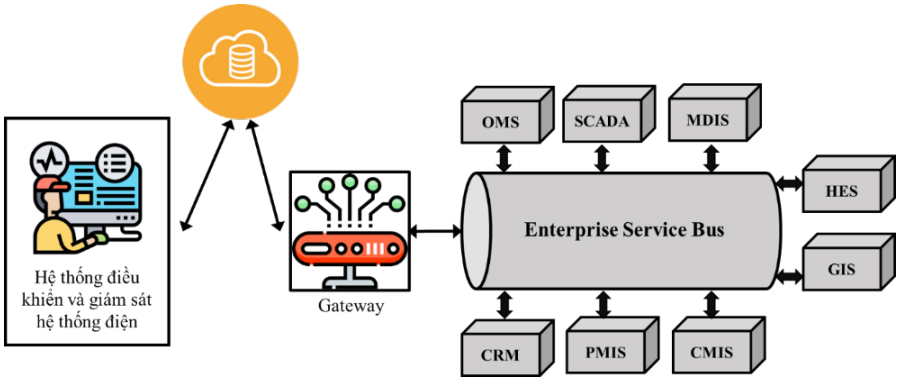
Tổng công ty Điện lực Thành phố Hồ Chí Minh (EVNHCMC) là đơn vị cung cấp điện cho toàn bộ Thành phố Hồ Chí Minh. Quá trình xây dựng và phát triển SG của EVNHCM được thực hiện trong bốn giai đoạn chính từ năm 2010 đến năm 2025 (Anh, 2023a). Qua kết quả nghiên cứu và phát triển của SG, chỉ số tin cậy cung cấp điện liên tục được cải thiện. Năm 2010, số lần mất điện bình quân trên một khách hàng là 28,85 lần/năm, trong khi năm 2022 đã giảm xuống còn 0,47 lần/năm. EVNHCMC đã lọt vào bảng xếp hạng 50 quốc gia có SG phát triển nhất thế giới năm 2022. Trong khối ASEAN, EVNHCMC tiếp tục đứng thứ hai, sau Công ty Điện lực Singapore (75 điểm, xếp thứ 42/94). Trong phần này, bài báo trình bày những lợi thế về cơ sở hạ tầng của lưới điện EVNHCMC để phát triển SG dựa trên ứng dụng DTT, bao gồm: hệ thống giám sát và điều khiển, phân tích dữ liệu, độ tin cậy của cung cấp điện, tích hợp các nguồn điện phân tán, an ninh hệ thống.

2.5.1. Hạ tầng công nghệ thông tin và phân tích dữ liệu

Với mục tiêu quản lý lưới điện toàn diện nhằm tối ưu hóa hoạt động của lưới điện và cung cấp thông tin liên tục, EVNHCMC đã xây dựng hạ tầng công nghệ thông tin, phát triển ứng dụng, chú trọng tích hợp, trao đổi cơ sở dữ liệu giữa các hệ thống thông tin. Việc tích hợp dữ liệu từ các hệ thống thông tin lõi được EVNHCMC triển khai với nhiều phần mềm ứng dụng được mô tả trong Bảng 2.

Bảng 2. Mô tả các hệ thống thông tin được ứng dụng trên lưới điện của EVNHCMC.

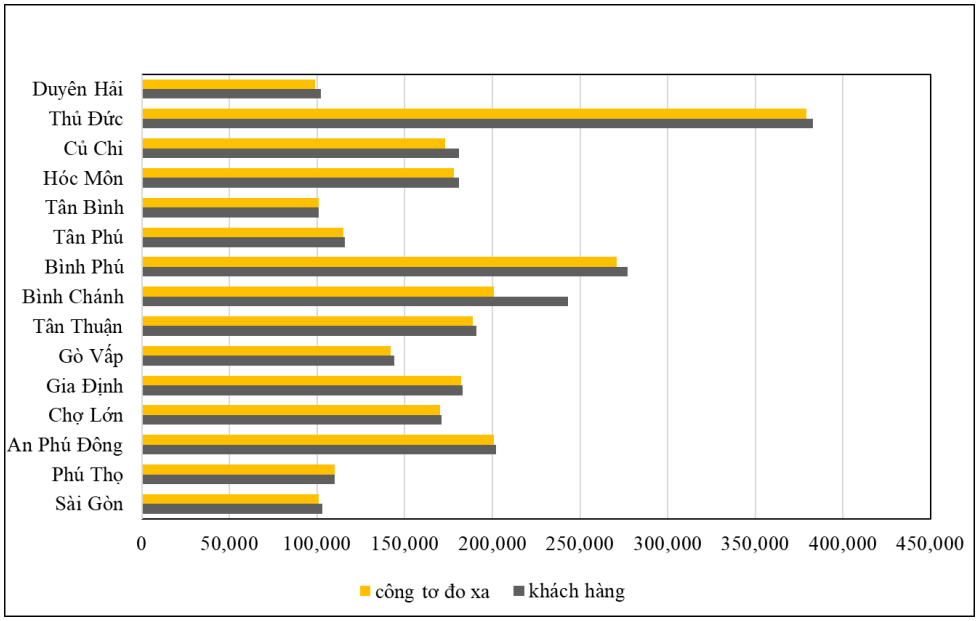
Ứng dụng	Tên đầy đủ của ứng dụng	Chức năng
PMIS	Hệ thống thông tin quản lý mạng điện	Hệ thống thông tin quản lý lưới điện với chức năng chính là quản lý tài sản lưới điện, quản lý sự cố, quản lý quy trình làm việc.
CMIS	Hệ thống thông tin quản lý khách hàng	Hệ thống thông tin khách hàng với chức năng quản lý hồ sơ cho các dịch vụ khách hàng và quy trình kinh doanh, hợp đồng, thiết bị đo lường, cung cấp điện, thu ngân, quản lý tổn thất
OMS	Hệ thống quản lý mất điện	Hệ thống quản lý thông tin mất điện với chức năng nhận dạng và cảnh báo sự cố, theo dõi và cập nhật tình trạng mất điện và sửa chữa cho bộ phận hỗ trợ khách hàng
SCADA	Kiểm soát giám sát và thu thập dữ liệu	Hệ thống giám sát điều khiển lưới điện và thu thập dữ liệu
MDIS	Hệ thống thông tin dữ liệu đo đếm	Hệ thống thông tin quản lý và tích hợp dữ liệu đo lường
GIS	Hệ thống thông tin địa lý	Hệ thống thông tin bản đồ số toàn bộ lưới điện cao thế, trung thế, hạ thế



Hình 4. Nguyên lý làm việc của hệ thống Enterprise Service Bus

Bên cạnh đó, để trao đổi nguồn dữ liệu dùng chung giữa các phần mềm, EVNHCMC đã đưa vào vận hành hệ thống Enterprise Service Bus (ESB), Hình 4 mô tả nguyên lý hoạt động của hệ thống ESB.

Dựa trên nguồn dữ liệu tích hợp, từ năm 2021, EVNHCMC đã triển khai kho dữ liệu, phân tích sâu, báo cáo, để phục vụ hoạt động sản xuất kinh doanh. Báo cáo đa chiều, trực tuyến và hỗ trợ cho các nhà lãnh đạo trong việc ra quyết định kịp thời để đạt được hiệu quả. Dữ liệu được đồng bộ, ngày càng chính xác và đầy đủ, đồng thời được chia sẻ giúp vận hành lưới điện hiệu quả. Với nguồn dữ liệu ngày càng tăng và nhu cầu về tốc độ xử lý, trao đổi nhanh, EVNHCMC đã chuyển sang nền tảng dữ liệu lớn và khai thác hiệu quả các công cụ tính toán, phân tích dữ liệu hiện đại. Hệ thống đo lường từ xa thông minh kết hợp với thu thập dữ liệu tiên tiến đã được triển khai (EVNHCMC, 2022e). Giải pháp này giúp liên tục thu thập dữ liệu người dùng và biểu đồ hồ sơ phụ tải phục vụ dự báo phụ tải và cảnh báo tình trạng sử dụng điện, vận hành, sự cố lưới điện bất thường (EVNHCMC, 2022l). Tỷ lệ lắp đặt đồng hồ từ xa thông minh được mô tả trong Hình 5, tính đến năm 2022.



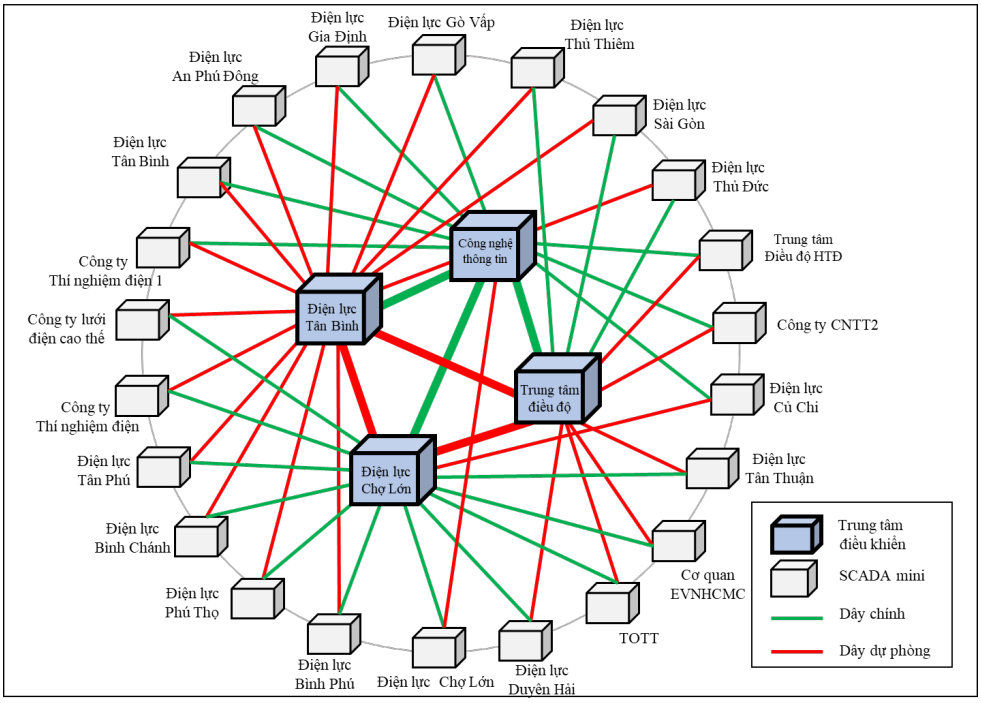
Hình 5. Công tơ thông minh đã lắp đặt cho tổng số khách hàng của các Công ty điện lực thuộc EVNHCMC (EVNHCMC, 2022e)

2.5.2. Hệ thống giám sát và điều khiển

EVNHCMC đã đưa vào vận hành Trung tâm điều độ hệ thống điện và hai trung tâm điều khiển từ xa hoạt động song song. Kết nối này đảm bảo rằng khi một trung tâm gặp sự cố phần cứng hoặc phần mềm, ngay cả khi nó hoàn toàn không khả dụng như mất điện hoặc tấn công, trung tâm còn lại sẽ đảm

nhận 100% công việc giám sát và vận hành từ xa của toàn bộ lưới điện (EVNHCMC, 2022d). Trung tâm điều độ được kết nối với các trung tâm điều khiển từ xa và hệ thống SCADA tại 15 công ty điện lực khu vực để thu thập dữ liệu lưới điện liên tục. Trung tâm điều độ với nhiệm vụ tiếp nhận toàn bộ tín hiệu của các thiết bị trên lưới điện và đấu nối các trạm biến áp vào trung tâm. Trung tâm này quản lý các hoạt động tự động hóa của lưới điện, cho phép nhận và truyền lệnh điều khiển khi người điều độ khi thực hiện công việc của mình. Hệ thống máy chủ SCADA tại trung tâm điều khiển được xây dựng trên công nghệ ảo hóa và được quản lý tập trung bởi hệ thống vCenter HA. Hệ thống vCenter HA có thể tự phân phối tài nguyên cho hệ thống máy chủ SCADA giúp hệ thống máy chủ này không bị gián đoạn khi có lỗi của một số phần cứng Server vật lý.

Mặt khác, một lợi thế lớn khác của hệ thống điện EVNHCMC là bán kính cung cấp điện ngắn và tập trung của từng đường dây trung thế. Các tuyến dây truyền tải điện kiểm soát phân đoạn được giới hạn trong các điều kiện sau: số lượng khách hàng từ 1.000-1.500/phân đoạn, dòng tải hoạt động từ 50-70A/ phân đoạn, chiều dài trục chính từ 1-2km/phân đoạn. Từ lợi thế này, EVNHCMC đã xây dựng riêng mạng viễn thông cáp quang để phục vụ dự án tự động hóa SG. Mạng viễn thông này là công cụ hữu ích đáp ứng yêu cầu trao đổi dữ liệu liên tục tốc độ cao đáp ứng yêu cầu của DTT. Hệ thống đấu nối mạch truyền tín hiệu SCADA của hệ thống điện EVNHCMC được thể hiện trong Hình 6.



Hình 6. Sơ đồ mạng viễn thông của hệ thống SCADA với các trung tâm điều khiển của hệ thống điện (EVNHCMC, 2022d)

Năm 2022, EVNHCMC đã hoàn thành xây dựng dự án trạm biến áp 110kV Tân Phú Trung, là một trong những dự án đầu tiên trong toàn EVNHCMC thí điểm ứng dụng công nghệ PROCESS BUS. Đây là công nghệ trạm biến áp số và được ứng dụng để xây dựng mới hoàn toàn trạm 110kV (EVNHCMC, 2022i). Đối với các trạm biến áp truyền thống trước đây thì việc truyền và nhận dữ liệu (bảo vệ, đo lường, điều khiển) từ các thiết bị bên ngoài sân ngắt vào tủ điều khiển bảo vệ đều sử dụng cáp đồng thì hiện nay đã được thay thế toàn bộ mạch thứ cấp bằng bằng cáp quang. Do đó, việc truyền nhận dữ liệu được thực hiện với tốc độ và độ chính xác cực cao chỉ với vài sợi cáp quang so với hệ thống hàng nghìn cáp đồng trước đây. Dữ liệu từ sân trạm đến nhà điều khiển được số hóa hoàn toàn, điều này cũng giúp công việc kết nối mạch thứ cấp khi tăng công suất và thời gian thực hiện sửa chữa ngắn hơn. Dễ dàng đánh giá toàn bộ hệ thống từ quy trình đầu vào/đầu ra đến điều khiển, bảo vệ và hệ thống SCADA.

2.5.3. Các ứng dụng và nền tảng tích hợp SCADA/DMS

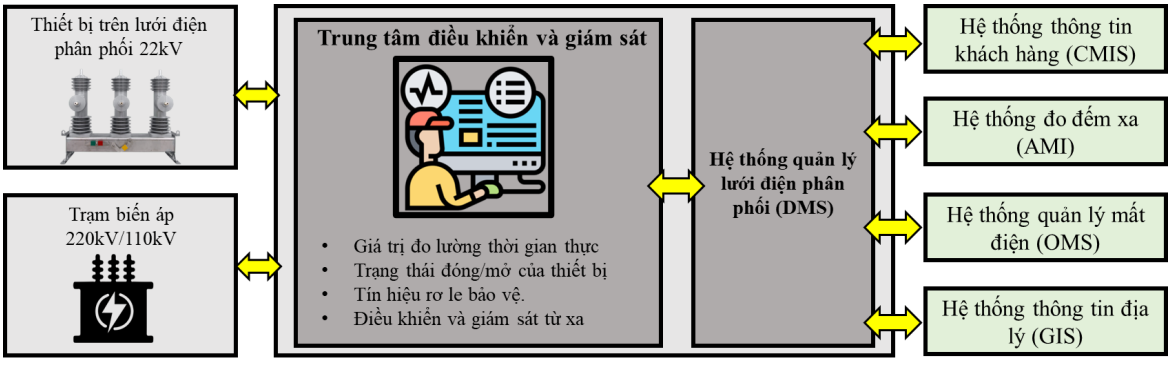
EVNHCMC đã đưa vào vận hành Trung tâm điều khiển đặt tại Trung tâm Điều độ hệ thống điện Thành phố Hồ Chí Minh, có thể quản lý và thao tác từ xa toàn lưới điện Thành phố Hồ Chí Minh với quy mô từ 110kV đến 22kV như sau (EVNHCMC, 2021a):

Đối với trạm biến áp 110 kV không người trực: Đã đấu nối tín hiệu SCADA để giám sát vận hành từ xa cho 05/05 của trạm biến áp 220 kV và 55/55 của trạm biến áp 110 kV (đạt tỷ lệ 100%). Điều khiển từ xa cho 55/55 trạm biến áp 110 kV (đạt 100%), trong đó bốn mươi sáu trạm biến áp đang vận hành ở chế độ hoàn toàn không có người trực và chỉ bố trí 02 nhân viên bảo vệ làm công tác bảo vệ, phòng cháy chữa cháy theo quy định (đạt tỷ lệ 82%).

Đối với hệ thống tự động hóa DG đã thực hiện giám sát, điều khiển 100% trạm ngắt 22 kV, đấu nối, giám sát và điều khiển từ xa 2.000 thiết bị đóng cắt có chức năng SCADA (LBS, Recloser, RMU). Đã triển khai giám sát và điều khiển từ xa cho 770/770 đường dây 22 kV (bao gồm cả thiết bị đóng cắt). Những vấn đề này đã giải quyết các chức năng mục tiêu của EVNHCMC cho mục tiêu từng bước hiện đại hóa lưới điện ở ba cấp độ, chi tiết được trình bày tại Bảng 3. Trong DMS, các công cụ, phần mềm được tích hợp với các nguồn dữ liệu để tính toán và quản lý lưới điện nhằm thực hiện các chức năng sau: tính toán phân bố phụ tải điện, tính toán lưu lượng công suất; chức năng định vị sự cố, cách ly sự cố và khôi phục các dịch vụ cung cấp điện, tái cấu trúc lưới điện để giảm tổn thất và ngăn ngừa quá tải, quản lý tải và điện áp, chức năng lập lịch mất điện. Quá trình tích hợp dữ liệu của hệ thống DMS được thể hiện trong Hình 7.

Bảng 3. Ba cấp độ cho mục tiêu hiện đại hóa SG của EVNHCMC (EVNHCMC, 2022d)

Cấp độ	Tên cấp độ	Chức năng
1	SCADA mini	Kết hợp hệ thống SCADA và hệ thống sơ đồ vận hành cho từng đường dây (Trạm biến áp >> đường dây >> thiết bị)
2	Hệ thống tự động hóa phân phối (DAS)	Kết hợp chức năng từ phần mềm FLISR và hệ thống SCADA. Hệ thống tự động hóa DG dựa vào tín hiệu sự cố từ SCADA để xác định vị trí sự cố và tín hiệu tải, nguồn trước sự cố từ hệ thống SCADA để tính toán phương thức truyền tải phù hợp.
3	Hệ thống quản lý lưới điện phân phối (DMS)	Hệ thống phần mềm tự động hỗ trợ quản lý, giám sát, điều khiển tối ưu DG. DMS cung cấp một bộ công cụ toàn diện để quản lý lưới điện.



Hình 7. Quy trình tích hợp dữ liệu của hệ thống quản lý DG (EVNHCMC, 2021a)

2.5.4. Tích hợp nguồn điện phân tán

EVNHCMC đã triển khai dự án lưới điện siêu nhỏ tại trung tâm dữ liệu, xây dựng bản đồ GIS để quản lý, đánh giá khả năng đấu nối của hệ thống điện mặt trời mái nhà (EVNHCMC, 2022c), hệ thống quản lý điện phân tán DERMS (EVNHCMC, 2022a). Từ các dự án ứng dụng được xây dựng, các nguồn điện phân tán đã được tích hợp vào hệ thống dữ liệu và được sử dụng trong phân tích dự đoán bởi nền tảng trí tuệ nhân tạo và máy học để đưa ra các phương thức vận hành tối ưu (EVNHCMC, 2021b, 2022m).

2.5.5. An ninh hệ thống điện và công nghệ thông tin

Trong SG, an ninh hệ thống là một thách thức lớn đối với các hệ thống điều khiển và giám sát. EVNHCMC đã triển khai nhiều giải pháp tăng cường an toàn thông tin cho lưới điện. Một số công nghệ an toàn thông tin đã được EVNHCMC áp dụng và chức năng của chúng được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Các công nghệ an ninh đang được ứng dụng trong hệ thống thông tin lưới điện

Tham khảo	Giải pháp đang sử dụng	Chức năng
(EVNHCMC, 2022k)	ISO/IEC 27001:2013 và 27019:2017	Đảm bảo an toàn trao đổi thông tin của hệ thống đo từ xa thông minh, hệ thống quản lý năng lượng, dữ liệu tổng hợp từ DMS
(EVNHCMC, 2022g)	Hệ thống quét và quản lý lỗ hổng	Ứng dụng giải pháp Tenable Security Center nhằm mục đích cung cấp khả năng giám sát toàn bộ hệ thống, phát hiện lỗ hổng chuyên sâu, phát hiện lỗ hổng, cấu hình sai, phần mềm độc hại và các mối đe dọa theo thời gian thực.
(EVNHCMC, 2022h)	Hệ thống quản lý phân tích LOG tập trung	Hệ thống quản lý LOG tập trung (Security Information and Event Management (SIEM) cho mạng OT và IT. Giải pháp này cho phép phân tích, phát hiện và ngăn chặn các cuộc tấn công từ bên ngoài vào hệ thống.
(EVNHCMC, 2022j)	Trung tâm điều hành bảo mật thông tin (SOC)	Việc áp dụng SOC chủ động phát hiện và phản ứng nhanh chóng khi hệ thống thông tin bắt đầu xuất hiện tình trạng mất an toàn.
(EVNHCMC, 2022b)	Công nghệ tường lửa một chiều diode	Ứng dụng của giải pháp này là ngăn chặn rò rỉ dữ liệu và loại bỏ các mối đe dọa mạng bằng cách chỉ cho phép truyền dữ liệu một chiều ở cả lớp vật lý và lớp giao thức
(EVNHCMC, 2022f)	Hệ thống phát hiện và loại bỏ phần mềm độc hại	Ứng dụng giải pháp OPSWAT Meta Defender cho phép phát hiện và loại bỏ phần mềm độc hại chuyên dụng, ngăn chặn các cuộc tấn công thông qua phần mềm độc hại.

2.6. Những thách thức và khó khăn khi phát triển lưới điện thông minh kỹ thuật số dựa trên công nghệ song sinh số đối với lưới điện của thành phố Hồ Chí Minh

Việc triển khai lưới điện thông minh kỹ thuật số dựa trên công nghệ song sinh số cho hệ thống điện thành phố Hồ Chí Minh mang lại nhiều lợi ích to lớn, tuy nhiên cũng đi kèm với những thách thức và khó khăn cần được giải quyết.

Về hạ tầng và nguồn lực: Một số hệ thống điều khiển trước đây được cung cấp bởi các hãng khác nhau, do đó việc tích hợp toàn bộ lưới điện và trao đổi dữ liệu giữa các hệ thống điều khiển khác nhau gặp nhiều khó khăn. Việc đầu tư cho hạ tầng và trang thiết bị mới đòi hỏi nguồn vốn lớn. Thay thế, lắp đặt các thiết bị điện trên lưới cho phép điều khiển, giám sát và trao đổi dữ liệu từ xa đòi hỏi chi phí lớn để đầu tư cao. Thiếu hụt nguồn nhân lực có chuyên môn cao trong lĩnh vực công nghệ số và lưới điện thông minh. Việc đào tạo phát triển nguồn nhân lực chất lượng cao để làm chủ công nghệ đòi hỏi phải có lộ trình lâu dài.

Vấn đề an ninh mạng: Lưới điện thông minh kỹ thuật số với khả năng kết nối mở rộng tiềm ẩn nguy cơ bị tấn công mạng, ảnh hưởng đến an ninh quốc gia và hoạt động kinh tế - xã hội. Việc xây dựng hệ thống an ninh mạng an toàn, bảo mật cho lưới điện là một bài toán cần được giải quyết thấu đáo. Để hệ thống hoạt động an toàn và đạt tốc độ trao đổi dữ liệu đáp ứng yêu cầu kỹ thuật cần thiết phải xây dựng mạng lưới viễn thông dùng riêng đòi hỏi nguồn kinh phí và thời gian thực hiện kéo dài.

Khung pháp lý và chính sách: Hệ thống khung pháp lý và chính sách hiện hành chưa đầy đủ để hỗ trợ cho việc phát triển và vận hành lưới điện thông minh kỹ thuật số. Cần xây dựng và ban hành các quy định, tiêu chuẩn phù hợp để đảm bảo hiệu quả và an toàn cho hệ thống điện.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bài báo này đã trình bày các khái niệm và kiến trúc cơ bản của công nghệ song sinh số và ứng dụng trong các lĩnh vực sản xuất. Với những động lực mà công nghệ song sinh số mang lại khi được ứng dụng cho phát triển lưới điện thông minh trong bối cảnh lưới điện có sự xâm nhập rất lớn các nguồn năng lượng tái tạo thì việc phát triển lưới điện kỹ thuật số là rất cần thiết. Bài báo cũng đã trình bày các nghiên cứu liên quan về ứng dụng công nghệ song sinh số

cho phát triển lưới điện thông minh trên thế giới, nêu được những ưu và nhược điểm mà công nghệ này mang lại cho phát triển lưới điện. Phân tích về đặc tính và cấu trúc của lưới điện kỹ thuật số dựa trên công nghệ song sinh số và những yêu cầu để có thể ứng dụng công nghệ này. Những thuận lợi của lưới điện thành phố Hồ Chí Mình như bán kính cung cấp điện ngắn và tải tiêu thụ tập trung, dễ tiếp cận nguồn nhân lực có trình độ, hệ thống điều khiển và trang thiết bị điện hiện đại nên hoàn toàn có thể đáp ứng việc ứng dụng công nghệ song sinh số để phát triển lưới điện. Tuy nhiên, việc áp dụng cần có lộ trình như phát triển đồng bộ hạ tầng công nghệ thông tin, đầu tư thiết bị, đặc biệt đào tạo và phát triển nguồn nhân lực để làm chủ công nghệ. Triển khai ứng dụng công nghệ lưới điện kỹ thuật số cần được thử nghiệm từ mạng điện nhỏ, độc lập để đánh giá hiệu quả về mặt vận hành cũng như giá trị làm lợi về các mặt kinh tế, quản trị và đặc biệt đảm bảo an ninh năng lượng cho phát triển kinh tế, chính trị - xã hội.

4. KẾT LUẬN

Song sinh số đã được thúc đẩy như một giải pháp cho quản lý lưới điện thông minh. Bằng cách tạo một bản sao ảo của lưới điện, song sinh số có thể giảm thiểu thời gian trì hoãn, tối ưu hóa hiệu suất và giảm chi phí bảo trì. Lưới điện thành phố Hồ Chí Minh đặc biệt phù hợp để hưởng lợi từ công nghệ song sinh số, có thể đảm bảo lưới điện đáng tin cậy và hiệu quả hơn cho tương lai. Khi nhu cầu năng lượng tiếp tục tăng, lưới điện hiệu quả và đáng tin cậy ngày càng trở nên quan trọng. Bằng cách cho phép giám sát thời gian thực và bảo trì dự đoán, công nghệ song sinh số cung cấp một giải pháp đầy hứa hẹn cho quản lý lưới điện thông minh. Lưới điện thành phố Hồ Chí Minh có thể ứng dụng công nghệ song sinh số để tăng cường khả năng phục hồi và giảm thiểu nguy cơ mất điện, từ đó đảm bảo cung cấp điện ổn định cho người dân. Những lợi thế rõ ràng của công nghệ song sinh số làm cho nó trở thành một triển vọng thú vị để mở ra một kỷ nguyên mới về quản lý lưới điện thông minh tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

Ahmadi, H., Nag, A., Khar, Z., Sayrafian, K., & Rahardja, S. (2021). Networked Twins and Twins of Networks: An Overview on the Relationship Between Digital Twins and 6G. *IEEE Communications Standards Magazine, 5*(4), 154-160. doi:10.1109/MCOMSTD.0001.2000041

Anh, T. V. (2023a). *EVNHCMC entered the top 50 world smart grid rankings (in Vietnamese)*. https://cskh.evnhcmc.vn/Tintuc/chitiet/1226

Arraño-Vargas, F., & Konstantinou, G. (2023). Modular Design and Real-Time Simulators Toward Power System Digital Twins Implementation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 19*(1), 52-61. doi:10.1109/TII.2022.3178713

Bai, H., & Wang, Y. (2022). Digital power grid based on digital twin: Definition, structure and key technologies. *Energy Reports, 8*, 390-397. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.328

Bazmohammadi, N., Madary, A., Vasquez, J. C., Mohammadi, H. B., Khan, B., Wu, Y., & Guerrero, J. M. (2022). Microgrid Digital Twins: Concepts, Applications, and Future Trends. *IEEE Access, 10*, 2284-2302. doi:10.1109/ACCESS.2021.3138990

Borowski, P. F. (2021). Digitization, Digital Twins, Blockchain, and Industry 4.0 as Elements of Management Process in Enterprises in the Energy Sector. *Energies, 14*(7), 1885.

Darbali-Zamora, R., Johnson, J., Summers, A., Jones, C. B., Hansen, C., & Showalter, C. (2021). State Estimation-Based Distributed Energy Resource Optimization for Distribution Voltage Regulation in Telemetry-Sparse Environments Using a Real-Time Digital Twin. *Energies, 14*(3), 774.

DNVGL. (2021a). *Detected Blade Crack: Detected by Our Structural Integrity Module. Retrieved from* https://www.dnvgl.com/cases/detected-blade-crack-168035

DNVGL. (2021b). *Heath, M. Digital Twin Detects Incorrect Control System Setting in Wind Turbine Using Remote Monitoring. Retrieved from* https://www.dnv.com/cases/digital-twin-detects-incorrect-control-system-setting-in-wind-turbine-using-remote-monitoring-174453

EVNHCMC. (2021a). *Applications and platforms integrated with SCADA/DMS system (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118100

EVNHCMC. (2021b). *Connection process, capacity storage map (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118107

EVNHCMC. (2022a). *GIS map to manage and evaluate the ability to connect EVNHCMC's rooftop solar system (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118515

EVNHCMC. (2022b). *Data Diode: Solution to ensure secure connection between OT and IT networks at EVNHCMC (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118541

EVNHCMC. (2022c). *Microgrid power grid project at the data center of Ho Chi Minh City Electricity Corporation (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118547

EVNHCMC. (2022d). *EVNHCMC completed the deployment of modern operation rooms at Power Companies (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118536

EVNHCMC. (2022e). *AMI system (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118545

EVNHCMC. (2022f). *Dedicated malware detection and extraction system at EVNHCMC (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118489

EVNHCMC. (2022g). *Security vulnerability scanning and management system (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118553

EVNHCMC. (2022h). *centralized LOG analysis management system (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118551

EVNHCMC. (2022i). *Tan Phu Trung 110kV transformer station - EVNHCMC's first digital station (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118503

EVNHCMC. (2022j). *Deploy information security monitoring center (SOC) at EVNHCMC (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118543

EVNHCMC. (2022k). *Applying ISO/IEC 27001:2013 and 27019:2017 in Operations and Management of IT & OT Network Information Security at EVNHCMC (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118555

EVNHCMC. (2022l). *Applying telemetry data in EVNHCMC's load research (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118517

EVNHCMC. (2022m). *Building a distributed resource management system DERMS (in Vietnamese).* https://www.evnhcmc.vn/SmartGrid/docTin/118509

GE. (2021a). *Digital Twin: Apply Advanced Analytics and Machine Learning to Reduce Operational Costs and Risks. Retrieved from* https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin?utm_medium=Paid-Search&utm_source=Google&utm_campaign=HORZ-DigitalTwin-MoF-EU-Search&utm_content=%2Bdigital%20%2Btwin

GE. (2021b). *Energy, G.R. Digital Wind Farm: The Next Evolution of Wind Energy. Retrieved from* https://www.ge.com/renewableenergy/sites/default/files/2020-01/digital-wind-farm-solutions-gea31821b-r2.pdf

Grieves, M. (2015). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. A Whitepaper by Dr. Michael Grieves.

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* (pp. 85-113). Cham: Springer International Publishing.

Hunt, R., Flynn, B., & Smith, T. (2019). The Substation of the Future: Moving Toward a Digital Solution. *IEEE Power and Energy Magazine, 17*(4), 47-55. doi:10.1109/MPE.2019.2908122

Jiang, Z., Lv, H., Li, Y., & Guo, Y. (2022). A novel application architecture of digital twin in smart grid. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 13*(8), 3819-3835. doi:10.1007/s12652-021-03329-z

Kandasamy, N. K., Venugopalan, S., Wong, T. K., & Leu, N. J. (2022). An electric power digital twin for cyber security testing, research and education. *Computers and Electrical Engineering, 101*, 108061. doi:https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108061

Kroposki, B., Bernstein, A., King, J., Vaidhynathan, D., Zhou, X., Chang, C. Y., & Dall'Anese, E. (2020). Autonomous Energy Grids: Controlling the Future Grid With Large Amounts of Distributed Energy Resources. *IEEE Power and Energy Magazine, 18*(6), 37-46. doi:10.1109/MPE.2020.3014540

Liu, S., Liu, P. X., & Wang, X. (2016). Stochastic Small-Signal Stability Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63*(2), 1027-1038. doi:10.1109/TIE.2015.2481359

Marot, A., Kelly, A., Naglic, M., Barbesant, V., Cremer, J., Stefanov, A., & Viebahn, J. (2022). Perspectives on Future Power System Control Centers for Energy Transition. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 10*(2), 328-344. doi:10.35833/MPCE.2021.000673

Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N. (2022). Development of a PSS for Smart Grid Energy Distribution Optimization based on Digital Twin. *Procedia CIRP, 107*, 1138-1143. doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.121

Nehrir, M. H., Wang, C., Strunz, K., Aki, H., Ramakumar, R., Bing, J., . . . Salameh, Z. (2011). A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, Control, and Applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2*(4), 392-403. doi:10.1109/TSTE.2011.2157540

Pan, H., Dou, Z., Cai, Y., Li, W., Lei, X., & Han, D. (2020). *Digital Twin and Its Application in Power System.* Paper presented at the 2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE).

Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). The Grid: Stronger, Bigger, Smarter?: Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience. *IEEE Power and Energy Magazine, 13*(3), 58-66. doi:10.1109/MPE.2015.2397334

Qian, C., Liu, X., Ripley, C., Qian, M., Liang, F., & Yu, W. (2022). Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions. *Future Internet 14*(2), 64.

Saad, A., Faddel, S., & Mohammed, O. (2020). IoT-Based Digital Twin for Energy Cyber-Physical Systems: Design and Implementation. *Energies 13*(18), 4762.

Sajadi, A., Kolacinski, R. M., Clark, K., & Loparo, K. A. (2019). Transient Stability Analysis for Offshore Wind Power Plant Integration Planning Studies—Part I: Short-Term Faults. *IEEE Transactions on Industry Applications, 55*(1), 182-192. doi:10.1109/TIA.2018.2868550

Song, Z., Hackl, C. M., Anand, A., Thommessen, A., Petzschmann, J., Kamel, O., . . . Hauptmann, S. (2023). Digital Twins for the Future Power System: An Overview and a Future Perspective. *Sustainability, 15*(6), 5259.

Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals, 67*(1), 169-172. doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055

Thinh, T. N. H., Lam, P. D., Huy, T. Q., Tien, L. H. C., & Thai, P. H. (2023). Transformer vibration and noise monitoring system using Internet of things. *IET Communications, 17*(7), 815-828. doi:https://doi.org/10.1049/cmu2.12585s

Xu, B., Wang, J., Wang, X., Liang, Z., Cui, L., Liu, X., & Ku, A. Y. (2019). A case study of digital-twin-modelling analysis on power-plant-performance optimizations. *Clean Energy, 3*(3), 227-234. doi:10.1093/ce/zkz025

Zhou, M., Yan, J., & Feng, D. (2019). Digital twin framework and its application to power grid online analysis. *CSEE Journal of Power and Energy Systems, 5*(3), 391-398. doi:10.17775/CSEEJPES.2018.01460