

NGHIÊN CỨU TỔNG HỢP VÀ ĐÁNH GIÁ VỀ PIN XE ĐIỆN: CÔNG NGHỆ, CÁC MÔ HÌNH VÀ MÔ PHỎNG TÍNH TOÁN HIỆU SUẤT PIN TRÊN XE GM EV1

RESEARCH AND REVIEW ON BATTERY FOR ELECTRIC VEHICLES: TECHNOLOGY,
MODELS AND CALCULATING SIMULATION FOR BATTERY PERFORMANCE
IN GM EV1

Nguyễn Đức Quang

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 09/6/2022, Ngày chấp nhận đăng: 11/8/2022, Phản biện: TS. Nguyễn Mạnh Quân

Tóm tắt:

Sự gia tăng nhanh chóng của các phương tiện giao thông không chỉ làm gia tăng nhu cầu tiêu thụ nhiên liệu mà còn gây ra các vấn đề ô nhiễm môi trường nghiêm trọng. Để đáp ứng mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính, phát triển xe điện dần thay thế xe động cơ đốt trong là xu hướng và giải pháp quan trọng trong kế hoạch của nhiều quốc gia, trong đó có Việt Nam. Bài báo trình bày ba nội dung nghiên cứu chính: nghiên cứu tổng hợp về các công nghệ pin xe điện điển hình đã và đang được sử dụng, nghiên cứu các mô hình mô phỏng pin và thực hiện mô phỏng tính toán hiệu suất của pin trên một cấu hình xe cụ thể.

Từ khóa:

Xe điện, các công nghệ pin, các mô hình pin, các tham số của pin, mô phỏng.

Abstract:

The rapid increase of means of transport not only increases the demand for fuel consumption but also causes serious environmental pollution problems. To meet the goal of reducing greenhouse gas emissions, developing electric vehicles to gradually replace internal combustion engine vehicles is an important trend and solution in the plans of many countries, including Vietnam. The paper presents three main research contents: a comprehensive study on typical electric vehicle battery technologies that have been used and are being used; study of battery simulation models and perform computational simulations of battery performance on a specific vehicle configuration.

Keywords:

Electric vehicles, battery technologies, battery models, battery parameters, simulation.

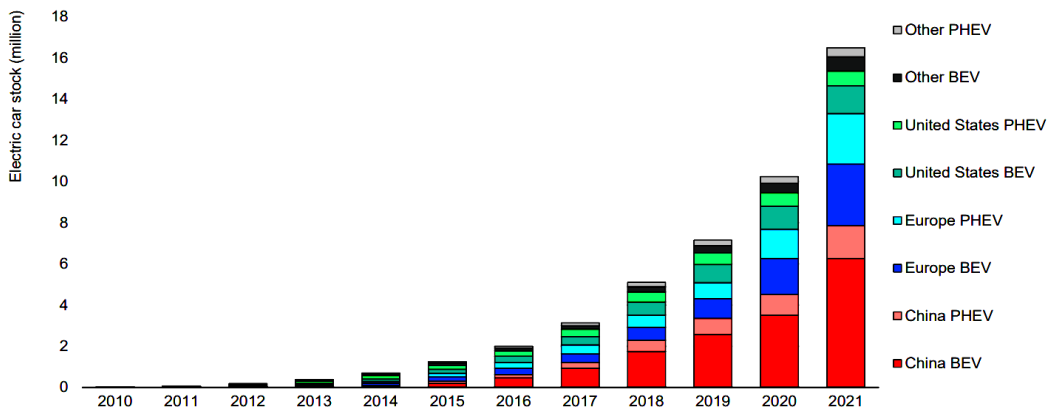
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển bền vững của toàn thế giới phụ thuộc một phần quan trọng vào việc giảm thiểu ô nhiễm môi trường. Bên cạnh

các nguồn năng lượng tái tạo, giao thông vận tải sạch và hiệu quả giữ một vai trò ngày càng lớn trong việc thực hiện nhiệm vụ này. Hiện nay và trong một tương lai

rất gần, các loại xe điện, bao gồm cả xe thuần điện và xe lai điện, sẽ thống trị thị trường xe sạch nói riêng và dần dần chiếm hữu tỷ trọng ngày càng lớn trong các phương tiện giao thông nói chung. Theo thống kê của Tổ chức Năng lượng quốc tế [1], năm 2021 đã có khoảng 16,5 triệu ô tô điện đang vận hành trên toàn thế giới.

Hình 1 biểu diễn số lượng xe điện toàn



Hình 1. Số lượng xe điện toàn cầu (thống kê của IEA [1])

Sự thành công này của xe điện được thúc đẩy bởi nhiều yếu tố: chính sách của các quốc gia trong việc ưu tiên giảm tải ô nhiễm môi trường và sự phát triển ngày cao của công nghệ ô tô điện, trong đó công nghệ pin giữ một vai trò quan trọng. Bài báo trình bày nghiên cứu về các công nghệ pin điển hình sử dụng trong xe điện, các mô hình mô phỏng pin và thực hiện mô phỏng tính toán cho một cấu hình xe thực tế với các trường hợp pin khác nhau nhằm đánh giá định lượng ưu và nhược điểm của các loại pin này.

2. CÁC CÔNG NGHỆ PIN XE ĐIỆN

Trong tiến trình phát triển của xe điện, pin luôn giữ vai trò thiết yếu trong các ứng

dụng trong giai đoạn 10 năm gần nhất, thống kê phân loại theo các xe thuần điện (BEV-Battery electric vehicle) và các xe lai điện (PHEV-Plug hybrid electric vehicle), các thị trường lớn là Trung Quốc, châu Âu, Mỹ và các khu vực còn lại. Số lượng xe điện năm 2021 gấp ba lần so với năm 2018 đã nói lên tốc độ tăng trưởng rất nhanh chóng của thị trường xe điện.

dụng xe điện từ giai đoạn mở đầu cho tới các ứng dụng hiện nay. Pin được cấu tạo bởi điện cực dương và điện cực âm với chất điện phân dẫn điện và cách điện ở giữa. Trong quá trình sạc pin, điện cực dương thường xảy ra phản ứng oxi hóa và điện cực âm xảy ra phản ứng khử. Trong quá trình phóng điện, phản ứng ngược lại và do đó cực tính các điện cực sẽ đảo ngược. Trong quá trình phát triển của mình, bốn loại pin điển hình đã được sử dụng cho xe điện cũng như xe lai điện là: pin axit-chì, pin nickel-metal-hydrite, pin nickel-cadmium và pin lithium-ion.

2.1. Pin axit-chì

Pin axit-chì là loại pin được sử dụng trong

thời kỳ đầu của kỷ nguyên xe điện. nguyên lý hoạt động của pin là sử dụng điện cực chì và axit kết hợp để tạo ra điện. Ưu điểm của pin là giá thành rẻ tuy nhiên pin có nhược điểm lớn là trọng lượng nặng, không thân thiện với môi trường và mật độ năng lượng riêng thấp, thường trong khoảng 20-40 W/kg [2] [3]. Nghiên cứu [4] chỉ ra rằng để cung cấp cho cùng một mẫu xe vận hành cùng một quãng đường nếu cần 150 kg trọng lượng Li-ion thì sẽ cần hơn 500 kg nếu sử dụng pin axit-chì. Tuổi thọ của pin axit-chì cũng là một nhược điểm khi ngắn hơn so với các loại pin khác như pin nickel metal hydride hay pin li-ion [5]. tuy nhiên, ưu điểm lớn của pin là giá thành rẻ nên hiện nay loại pin này vẫn có thể được sử dụng cho các phương tiện vận tải nhỏ, yêu cầu hiệu suất thấp [6].

Với các nhược điểm cốt yếu như vậy, pin axit-chì dần được thay thế bằng pin dựa trên nickel, điển hình như NiMH và NiCd.

2.2. Pin nickle-metal-hydrite (NiMH)

Pin nickle-metal-hydrite (NiMH) là một trong hai loại pin được sử dụng phổ biến cho ứng dụng xe điện hiện nay cùng với pin lithium ion. Pin có mật độ năng lượng cao hơn nhiều, vòng đời dài hơn và trọng lượng nhẹ hơn so với pin axit-chì. Tuy nhiên, pin dựa trên nickel có nhược điểm là hiệu suất sạc/xả kém và tốc độ tự xả cao. Tuổi thọ của pin sẽ bị giảm đáng kể nếu nó bị xả nhanh lặp đi lặp lại nhiều lần

nhằm tạo năng lượng nhanh cho xe điện [2]. Vì vậy, pin NiMH phù hợp hơn khi sử dụng trong các ứng dụng xe lai điện, điển hình như sử dụng trong xe Toyota Prius, khi nguồn của xe được bổ sung song song bằng một động cơ đốt trong [5], [7].

2.3. Pin nickel-cadmium (NiCd)

Một loại pin phổ biến khác dựa trên nickel là pin nickel-cadmium (NiCd). Pin NiCd cũng có ưu điểm chung của pin nickel như mật độ năng lượng cao hơn và trọng lượng nhẹ hơn so với pin axit-chì. Tuy nhiên, pin NiCd [8] có công suất điện tương đối thấp. Công suất điện thấp có thể gây chảy hoặc cháy pin nếu pin bị phóng điện sâu và sạc nhanh trong thời gian ngắn. Đồng thời, do thành phần cấu tạo có cadmium nên pin NiCd kém thân thiện hơn pin NiMH nhiều lần [9].

2.4. Pin lithium-ion

Pin lithium-ion (Li-ion) là loại pin được sử dụng rộng rãi và phổ biến nhất hiện nay trong các ứng dụng xe điện. Pin Li-ion [10], [11] sở hữu mật độ năng lượng cao, thậm chí tốt hơn cả pin nickel do phân tử Li có thế năng điện hóa cao và trọng lượng riêng thấp. Pin Li-ion [12], [13] có hiệu suất cao, tuổi thọ dài, độ tự phóng điện thấp và rất thân thiện với môi trường do hầu hết các bộ phận đều có thể tái chế. Nhược điểm lớn nhất của pin Li-ion nằm ở khía cạnh kinh tế, do giá thành cao hơn các loại pin khác.

Bảng 1. Tổng hợp so sánh đặc điểm các công nghệ pin [14], [15]

	Axit-chì	NiCd	NiMH	Li-ion
Mật độ năng lượng (Wh/kg)	20~30	≤ 50	≤ 60	≥ 100
Chu kỳ tuổi thọ	400	500~1000	400~	300~
Tự xả	10%	30%	30%	3%
Thân thiện môi trường	Không	Không	Có	Có
Trọng lượng	Rất nặng	Nặng	Trung bình	Nhẹ

Bảng 1 trình bày so sánh các đặc điểm chính của bốn loại pin điển hình đã miêu tả ở trên. Với ưu điểm nổi trội về hai thông số quan trọng, mật độ năng lượng cao nhất và trọng lượng thấp nhất, pin Li-ion là pin phù hợp nhất trong các ứng dụng xe điện hiện nay.

3. CÁC MÔ HÌNH PIN

Nếu như các xe động cơ đốt trong (ICE), mức đo nhiên liệu hóa thạch có thể dễ dàng đo được trong bình, thì năng lượng tại thời điểm thực tế trong pin không thể đo một cách trực tiếp do SOC (Stage of Charge) phụ thuộc vào nhiều thông số khác như nhiệt độ, dòng điện và chu kỳ nạp xả thực tế [16]. Các mô hình pin giữ một vai trò quan trọng trong việc nghiên cứu để dự đoán hoạt động điện của pin, nắm bắt các thông tin về trạng thái sạc SOC và trạng thái sức khỏe SOH (State of Health) của pin, qua đó đảm bảo xe điện

có thể vận hành một cách an toàn và hiệu quả. Trong quá trình phát triển của mình, có nhiều phương pháp mô hình hóa pin với những ưu điểm và nhược điểm khác nhau [17], [18], tuy nhiên có thể xếp các mô hình mô phỏng pin xe điện thành 3 nhóm chính: mô hình thực nghiệm, mô hình điện hóa và mô hình mạch tương đương.

3.1. Mô hình thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm [19], [20], [21], [22], [23] còn gọi là mô hình toán học. Đây là các mô hình pin mà các nhà nghiên cứu thu được từ kết quả thực nghiệm, sử dụng phương pháp tiếp cận ngẫu nhiên để dự đoán một số đặc tính của pin. Điểm hạn chế của mô hình này là tính chính xác không cao, sai số lớn, không đưa ra được mối quan hệ trực tiếp giữa các hiện tượng, phản ứng hóa học xảy ra trong pin. Đồng thời, mô hình thực nghiệm khó đưa chính xác các dự đoán SOC của pin khi các dòng điện biến thiên.

3.2. Mô hình điện hóa

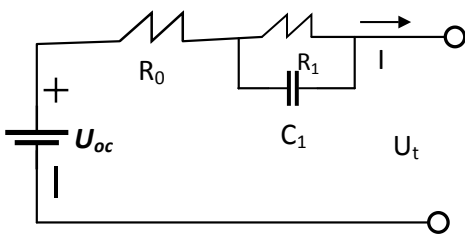
Các mô hình điện hóa [21], [24], [25], [26] sử dụng các phương trình đạo hàm riêng biến thiên theo thời gian biểu diễn tính chất của điện cực và chất điện phân của pin được mô phỏng. Mô hình điện hóa có ưu điểm là độ chính xác cao hơn so với mô hình toán học hoặc mô hình thực nghiệm. Tuy nhiên, nhược điểm của mô hình điện hóa là các hạn chế, khó khăn đi kèm trong việc đảm bảo thực hiện khối lượng tính toán lớn và phức tạp, cũng như yêu cầu các dữ liệu hóa học đầu vào chi tiết của pin, các thông số này đôi khi không được nhà sản xuất công bố.

3.3. Mô hình mạch tương đương

Các mô hình mạch tương đương [27]–[32] sử dụng mạch điện với các thành phần điện trở, tụ điện được ghép nối thích hợp nhằm mô hình hóa hoạt động của pin và biểu diễn các hiện tượng bên trong pin. Mô hình pin dựa trên nguyên lý mạch tương đương có nhiều loại, được xây dựng với mức độ phức tạp và độ chính xác khác nhau tùy thuộc vào yêu cầu và mục đích sử dụng mong muốn. Các mô hình pin sử dụng mạch tương đương điển hình là: mô hình Thevenin, mô hình R_{int} , mô hình DP và gần đây là mô hình sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng.

3.3.1. Mô hình Thevenin

Mô hình Thevenin [33]–[36] sử dụng điện trở nối tiếp và mạng song song RC để mô tả phản ứng của pin với tải và giả thiết điện áp hở mạch không đổi. Độ chính xác của mô hình pin nghiên cứu có thể được nâng cao lên bằng cách gia tăng số lượng mạng RC song song.



Hình 2. Mô hình Thevenin [33], [34]

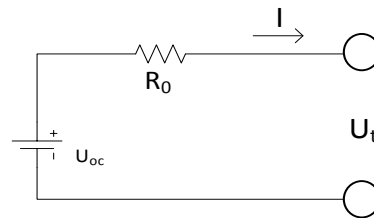
Hình 2 biểu diễn mô hình Thevenin của pin trong đó R_1 là điện trở phân cực, C_1 là điện dung phân cực và U_1 là điện áp của mạng RC. Phương trình mô hình

Thevenin:

$$U_t = U_{OC} - U_1 - I.R_o \quad (1)$$

3.3.2. Mô hình R_{int}

Mô hình R_{int} [37]–[39] để mô phỏng pin hay còn gọi là mô hình điện trở trong (internal resistance model – R_{int}) có cấu tạo khá đơn giản, chỉ bao gồm một nguồn áp và một điện trở. Các tham số thay đổi theo SOC, nhiệt độ của pin và hướng của dòng điện theo chiều sạc hoặc xả.



Hình 3. Mô hình R_{int}

Phương trình biểu diễn:

$$U_t = U_{OC} - I.R_o \quad (2)$$

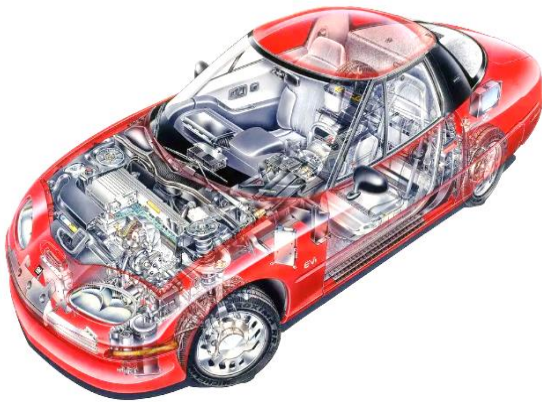
Trong mô hình trên, U_t là điện áp đầu ra, R_o là điện trở trong, U_{OC} chỉ nguồn áp OCV, I là dòng điện phóng của pin.

4. MÔ PHỎNG PIN

4.1. Phương pháp nghiên cứu

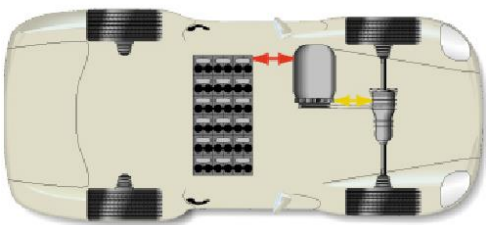
Để so sánh, định lượng về hiệu quả của các loại pin điển hình, nhóm nghiên cứu thực hiện mô phỏng đặc tính các loại pin thông qua phần mềm Advisor-Matlab simulink khi được lắp lên cùng một mẫu xe cụ thể. Phương pháp mô phỏng pin được lựa chọn là R_{int} với các tham số thực tế tương ứng từng loại pin.

Mẫu xe được lựa chọn là GM EV1 của General Motors, đây là mẫu xe điện đầu tiên được sản xuất hàng loạt trên thế giới. Về kiểu dáng, GM EV1 là một mẫu xe 2 cửa cỡ nhỏ được trang bị một động cơ điện không đồng bộ xoay chiều ba pha cho công suất tối đa 137 mã lực và mô men xoắn 149 Nm. Về lưu trữ năng lượng, GM EV1 có hai thể hệ tương ứng sử dụng pin axit-chì và pin NiMH.



Hình 4. Bộ cục xe GM EV1
(nguồn: motor1.com)

Bài báo mô phỏng xe GM EV1 trong hai trường hợp: sử dụng pin axit-chì và pin NiMH với các thông số của xe và pin thực tế để đánh giá ưu và nhược điểm cụ thể của từng loại pin.



Hình 5. Các khối truyền động của xe GM EV1 trong Advisor

Hình 5 mô tả các khối hoạt động chính

của xe GM EV1: hệ thống pin kết nối trực tiếp tới động cơ sau đó dẫn truyền chuyển động qua hộp số tới trục cầu trước của xe.

Bảng 2. Các thông số cơ bản của xe GM EV1

Hệ thống truyền động	Xe điện
Động cơ	MC_AC124_EV1
Pin	Axit-chì hoặc NiMH
Dẫn động	Dẫn động cầu trước
Trọng lượng xe (không tính pin)	1,4 tấn

4.2. Kết quả mô phỏng

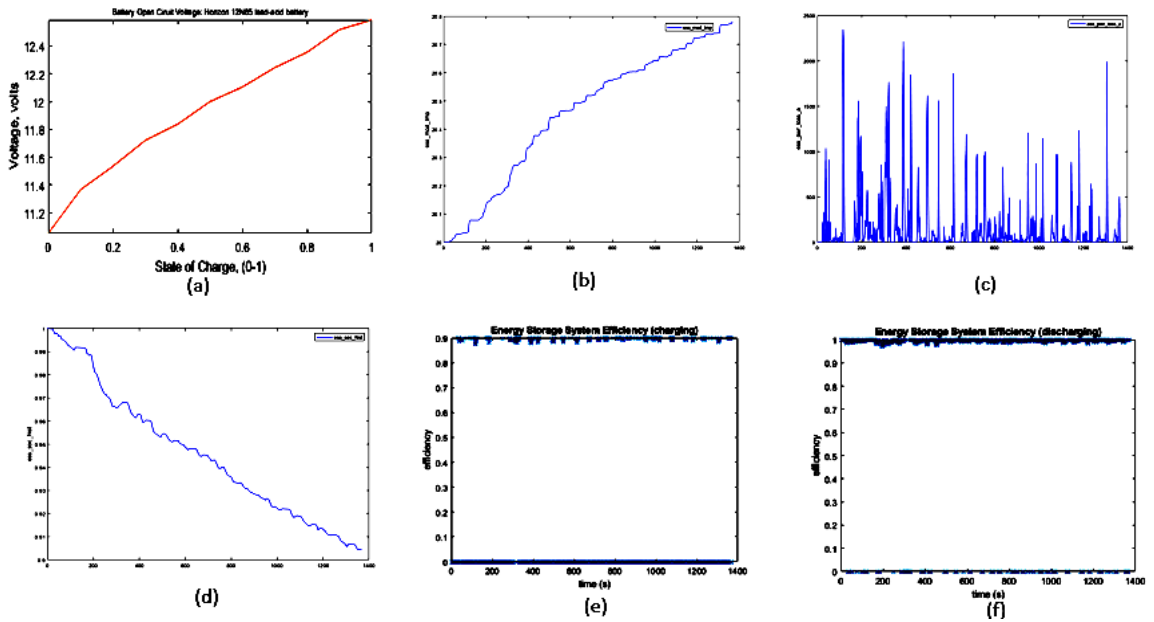
4.2.1. Mô hình Thevenin

Trường hợp 1, mô phỏng thực hiện khi sử dụng pin axit-chì nhãn hiệu Horizon. Các kết quả thu được như hình 6.

Hình 6 biểu diễn kết quả mô phỏng của pin axit-chì PB85 với các giá trị thu được là: điện áp hở mạch V_{oc} , nhiệt độ của pin, tổn thất pin, SOC, hiệu suất pin khi sạc và khi xả.

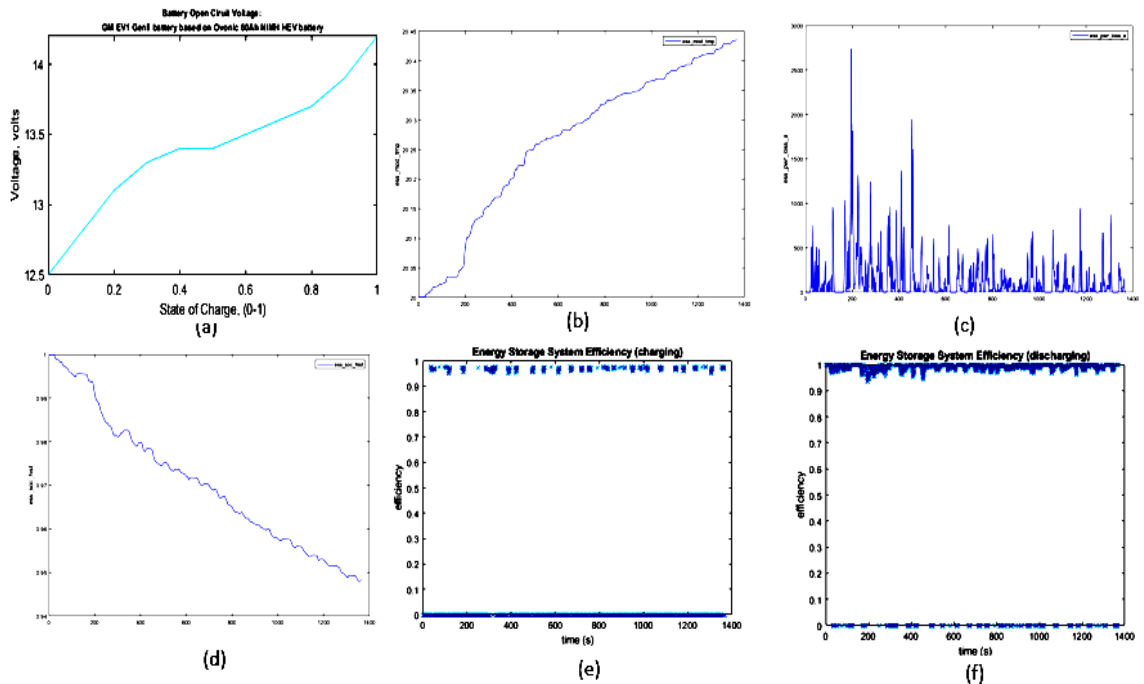
Trường hợp 2, mô phỏng thực hiện khi sử dụng pin Ovonic 60Ah NiMH đã lắp trên xe GV EV1 gen 2. Kết quả mô phỏng thu được như hình 7.

Hình 7 biểu diễn kết quả mô phỏng của pin Ovonic 60Ah NiMH với các giá trị thu được là: điện áp hở mạch V_{oc} , nhiệt độ của pin, tổn thất pin, SOC, hiệu suất pin khi sạc và khi xả. Kết quả mô phỏng theo trình tự thời gian tương tự như giả thuyết mô phỏng ở trường hợp 1.



Hình 6. Kết quả mô phỏng của pin axit-chì

a - Điện áp hở mạch (V); b - Nhiệt độ của module ($^{\circ}\text{C}$); c - Tổn thất thực tế (W)
d - SOC của pin; e - Hiệu suất của pin khi sạc; f - Hiệu suất của pin khi xả



Hình 7. Kết quả mô phỏng của pin Ovonic 60Ah NiMH

a - Điện áp hở mạch (V); b - Nhiệt độ của module ($^{\circ}\text{C}$); c - Tổn thất thực tế (W)
d - SOC của pin; e - Hiệu suất của pin khi sạc; f - Hiệu suất của pin khi xả

Bảng 3. So sánh kết quả mô phỏng pin PB85 và Ovonic NiMH

	Đơn vị	PB85	Ovonic NiMH
Hiệu suất	%	88,08	94,12
Tổn thất	kJ	204,91	192,09
Điện áp cực đại	V	16,50	15,68
Điện áp cực tiểu	V	9,50	9,14
Năng lượng lưu trữ	kJ	$5,49.10^3$	$5,48.10^3$
Hiệu suất xả trung bình	%	99,05	97,87
Hiệu suất sạc trung bình	%	88,92	96,16

Từ kết quả mô phỏng ta nhận thấy:

Dải điện áp hoạt động, điện áp cực đại và điện áp cực tiểu tương đương với độ chênh thấp;

Tổn thất của pin PB85 cao hơn pin Ovonic NiMH: 6,3%;

Hiệu suất xả trung bình của PB85 cao hơn Ovonic NiMH nhưng không nhiều, khoảng 1,2 %;

Tuy nhiên, hiệu suất sạc trung bình của

NiMH lại cao hơn PB5 tới 8,1 %;

Và thông số quan trọng nhất, hiệu suất tính toán được của pin Ovonic NiMH cao hơn PB85 hơn 6%.

5. KẾT LUẬN

Bài báo thực hiện một nghiên cứu tổng hợp về các công nghệ pin đã và đang sử dụng trong xe điện, cụ thể là: pin axit-chì, pin NiMH, pin NiCd và pin Li-ion. Các tính chất và các đặc điểm điển hình của các loại pin này đã được trình bày và so sánh.

Sau đó, các mô hình mô phỏng pin đã được báo cáo và tổng hợp trong 3 nhóm mô hình chính: mô hình thực nghiệm, mô hình điện hóa, và mô hình mạch tương đương. Cuối cùng, một mô phỏng với hai kịch bản pin khác nhau được lắp lên cùng một mẫu xe điện thực tế nhằm tính toán hiệu suất và các giá trị năng lượng của pin được thực hiện nhằm định lượng, đánh giá các nghiên cứu tổng hợp nói trên. Nhận thấy rằng: pin NiMH và pin Li-ion có những ưu điểm vượt trội về hiệu suất và mật độ năng lượng, do đó rất thích hợp để sử dụng trong các ứng dụng xe điện hiện nay.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] IEA, "Global EV Outlook 2022 Securing supplies for an electric future," 2022. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>.
- [2] R. A. Hanifah, S. F. Toha, and S. Ahmad, "Electric Vehicle Battery Modelling and Performance Comparison in Relation to Range Anxiety," in *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 76, pp. 250–

256, doi: 10.1016/j.procs.2015.12.350.

- [3] J. M. Miller, "Energy storage system technology challenges facing strong hybrid, plugin and battery electric vehicles," in *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, 2009, pp. 4–10, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289879.
- [4] G. J. Offer, D. Howey, M. Contestabile, R. Clague, and N. P. Brandon, "Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system," *Energy Policy*, vol. 38, no. 1, pp. 24–29, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.040.
- [5] A. F. Burke, "Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 806–820, 2007, doi: 10.1109/JPROC.2007.892490.
- [6] and J. O. Andrew Burke, Bryan Jungers, Christopher Yang, "Battery Electric Vehicles: An Assessment of the Technology and Factors Influencing Market readiness," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013, Accessed: Jul. 19, 2022. [Online]. Available: https://scholar.google.com/scholar?hl=vi&as_sdt=0%2C5&q=Battery+electric+vehicles%3A+an+a+ssessment+of+the+technology+and+factors+influencing+market+readiness&btnG=
- [7] J. M. Miller, T. Bohn, T. J. Dougherty, and U. Deshpande, "Why hybridization of energy storage is essential for future hybrid, plug-in and battery electric vehicles," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009*, 2009, pp. 2614–2620, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316096.
- [8] A. Mahmoudzadeh Andwari, A. Pesiridis, S. Rajoo, R. Martinez-Botas, and V. Esfahanian, "A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78. Elsevier Ltd, pp. 414–430, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.138.
- [9] M. Catenacci, E. Verdolini, V. Bosetti, and G. Fiorese, "Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles," *Energy Policy*, vol. 61, pp. 403–413, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.06.078.
- [10] J. Deberitz, *Lithium: Production and Application of a Fascinating and Versatile Element*. 2006.
- [11] G. Ombach and J. Junak, "Weight and efficiency optimization of auxiliary drives used in automobile," 2010, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608280.
- [12] S. F. Schuster, M. J. Brand, P. Berg, M. Gleissenberger, and A. Jossen, "Lithium-ion cell-to-cell variation during battery electric vehicle operation," *J. Power Sources*, vol. 297, pp. 242–251, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.08.001.
- [13] B. Scrosati and J. Garche, "Lithium batteries: Status, prospects and future," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 9. pp. 2419–2430, 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.
- [14] R. F. Nelson, "High-power batteries for the new 36/42 V automotive systems," in *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 107, no. 2, pp. 226–239, doi: 10.1016/S0378-7753(01)01082-5.
- [15] J. H. Kim, S. J. Lee, E. S. Kim, S. K. Kim, C. H. Kim, and L. Prikler, "Modeling of battery for EV using EMTP/ATPDraw," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 98–105, 2014, doi: 10.5370/JEET.2014.9.1.098.
- [16] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. L. Regtien, and P. H. L. Notten, *Battery Management Systems. Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*, vol. 9. 2008.
- [17] K. Tatsumi, "Aspects of Technology Developments of Lithium and Lithium-ion Batteries for Vehicle

- Applications in National R&D Projects of Japan," *J. Asian Electr. Veh.*, vol. 8, no. 2, pp. 1415–1418, 2010, doi: 10.4130/jaev.8.1415.
- [18] G. Yasser, P. Theophile, M. Tedjani, and D. Sylvain, "Modeling, Identification and Simulation of Hybrid Battery/Supercapacitor Storage System Used in Vehicular Applications," in *ICEVT 2019 - Proceeding: 6th International Conference on Electric Vehicular Technology 2019*, Nov. 2019, pp. 156–162, doi: 10.1109/ICEVT48285.2019.8994014.
- [19] A. Capel, "Mathematical model for the representation of the electrical behaviour of a lithium cell," in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2001, vol. 4, pp. 1976–1981, doi: 10.1109/PESC.2001.954411.
- [20] R. C. Kroeze and P. T. Krein, "Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations," in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 1336–1342, doi: 10.1109/PESC.2008.4592119.
- [21] M. Chen and G. A. Rincón-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 2, pp. 504–511, Jun. 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.874229.
- [22] P. Rong and M. Pedram, "An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries," *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 14, no. 5, pp. 441–451, May 2006, doi: 10.1109/TVLSI.2006.876094.
- [23] P. M. Gomadam, J. W. Weidner, R. A. Dougal, and R. E. White, "Mathematical modeling of lithium-ion and nickel battery systems," in *Journal of Power Sources*, Aug. 2002, vol. 110, no. 2, pp. 267–284, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00190-8.
- [24] D. W. Dees, V. S. Battaglia, and A. Bélanger, "Electrochemical modeling of lithium polymer batteries," in *Journal of Power Sources*, Aug. 2002, vol. 110, no. 2, pp. 310–320, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00193-3.
- [25] L. Song and J. W. Evans, "Electrochemical-Thermal Model of Lithium Polymer Batteries," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 147, no. 6, p. 2086, Jun. 2000, doi: 10.1149/1.1393490.
- [26] N. A. Chaturvedi, R. Klein, J. Christensen, J. Ahmed, and A. Kojic, "Algorithms for Advanced Battery-Management Systems: Modeling, estimation, and control challenges for lithium-ion batteries," *IEEE Control Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 49–68, 2010, doi: 10.1109/MCS.2010.936293.
- [27] J. Meng, G. Luo, M. Ricco, M. Swierczynski, D. I. Stroe, and R. Teodorescu, "Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles," *Appl. Sci.* 2018, Vol. 8, Page 659, vol. 8, no. 5, p. 659, Apr. 2018, doi: 10.3390/APP8050659.
- [28] M. Zheng, B. Qi, and X. Du, "Dynamic model for characteristics of Li-ion battery on electric vehicle," in *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009*, 2009, pp. 2867–2871, doi: 10.1109/ICIEA.2009.5138733.
- [29] H. Rahimi-Eichi, F. Baronti, and M. Y. Chow, "Online adaptive parameter identification and state-of-charge coestimation for lithium-polymer battery cells," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 2053–2061, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2263774.
- [30] S. X. Chen, K. J. Tseng, and S. S. Choi, "Modeling of lithium-ion battery for energy storage system simulation," 2009, doi: 10.1109/APPEEC.2009.4918501.

- [31] M. Urbain, S. Rael, and B. Davat, "Energetical Modeling of Lithium-Ion Batteries," Oct. 2008, pp. 714–721, doi: 10.1109/07ias.2007.113.
- [32] B. Y. Liaw, G. Nagasubramanian, R. G. Jungst, and D. H. Doughty, "Modeling of lithium ion cells - A simple equivalent-circuit model approach," in *Solid State Ionics*, Nov. 2004, vol. 175, no. 1–4, pp. 835–839, doi: 10.1016/j.ssi.2004.09.049.
- [33] M. Wiecek and M. Lewandowski, "A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm," *Appl. Energy*, vol. 192, pp. 222–233, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.022.
- [34] B. Wu and B. Chen, "Study the performance of battery models for hybrid electric vehicles," Oct. 2014, doi: 10.1109/MESA.2014.6935559.
- [35] B. Schweighofer, K. M. Raab, and G. Brasseur, "Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, no. 4, pp. 1087–1091, 2003, doi: 10.1109/TIM.2003.814827.
- [36] S. Buller, M. Thele, R. W. A. A. De Doncker, and E. Karden, "Impedance-based simulation models of supercapacitors and li-ion batteries for power electronic applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 3, pp. 742–747, May 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.847280.
- [37] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach," *Energies 2011, Vol. 4, Pages 582-598*, vol. 4, no. 4, pp. 582–598, Mar. 2011, doi: 10.3390/EN4040582.
- [38] L. Chen *et al.*, "Estimation the internal resistance of lithium-ion-battery using a multi-factor dynamic internal resistance model with an error compensation strategy," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 3050–3059, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.05.027.
- [39] X. Wei, B. Zhu, and W. Xu, "Internal resistance identification in vehicle power lithium-ion battery and application in lifetime evaluation," *2009 Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA 2009*, vol. 3, pp. 388–392, 2009, doi: 10.1109/ICMTMA.2009.468.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Đức Quang nhận bằng Thạc sĩ tại Đại học Lille 1 và bảo vệ luận án Tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại Đại học Quốc gia Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paristech, Cộng hòa Pháp năm 2013. Hiện nay tác giả công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: các phương pháp số trong nghiên cứu máy điện và hệ thống điện, tác động của trường điện từ tương hỗ, xe điện và các nguồn năng lượng tái tạo.