

SO SÁNH CÁC CẤU HÌNH TRUYỀN LỰC Ô TÔ HYBRID (HEV)

A COMPARISON OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE (HEV) POWERTRAIN CONFIGURATIONS

Nguyễn Hùng Mạnh

Khoa Cơ khí - Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện lực

*Email: manhnh@epu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo phân tích so sánh các cấu hình truyền động Hybrid phổ biến trên ô tô, bao gồm cấu hình nối tiếp, song song, nối tiếp-song song và phức hợp. Mỗi cấu hình được đánh giá dựa trên các tiêu chí hiệu năng và hiệu suất vận hành, bao gồm tỷ lệ công suất động cơ/mô-tơ, chế độ vận hành, hiệu suất truyền động, hiệu quả nhiên liệu, chi phí và độ phức tạp hệ thống. Kết quả nghiên cứu cho thấy mỗi cấu hình có những ưu nhược điểm riêng, phù hợp với các điều kiện vận hành và mục đích sử dụng khác nhau.

Từ khóa: Ô tô điện Hybrid (Ô tô Hybrid); Truyền lực Hybrid nối tiếp; Truyền lực Hybrid song song; Truyền lực Hybrid nối tiếp - song song; Truyền lực Hybrid phức hợp.

ABSTRACT

This paper presents the results of a comparative analysis of popular hybrid vehicle powertrain configurations, including series, parallel, series-parallel, and complex configurations. The evaluation is based on performance and operating efficiency criteria, including engine/motor power ratio, operating mode, transmission efficiency, fuel efficiency, cost, and system complexity. The results show that each configuration has its own advantages and disadvantages, suitable for different operating conditions and purposes.

Keywords: Hybrid Vehicle (HEV); Series Hybrid Drive; Parallel Hybrid Drive; Series-Parallel Hybrid Drive; Complex Hybrid Drive.

Chữ viết tắt:

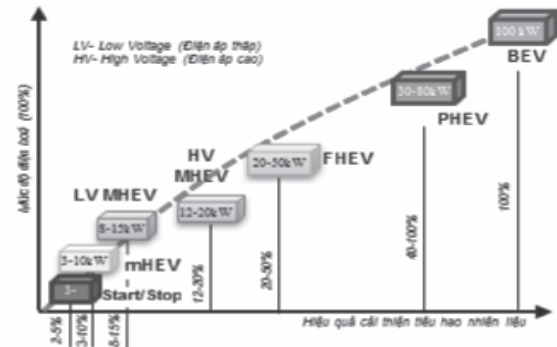
TT	Chữ viết tắt	Ý nghĩa
1	HEV (Hybrid Electric Vehicle)	Ô tô/ Xe Hybrid
2	BEV (Battery Electric Vehicle)	Ô tô thuần điện
3	ICE (Internal Combustion Engine)	Động cơ đốt trong

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ô tô dùng động cơ đốt trong (ICEV - Internal Combustion Engine Vehicle) hiện còn phổ biến trên toàn thế giới, chúng cũng là một trong số các nguồn phát thải khí nhà kính (CO_2) đáng kể [1]. Khí nhà kính là một trong số tác nhân trực tiếp gây biến đổi khí hậu toàn cầu. Mặt khác hiệu suất hoạt động của ICEV thường thấp hơn 30% [2]. Thế giới hiện nay đang có sự chuyển dịch mạnh sang sử dụng ô tô điện (BEV; HEV). BEV có ưu điểm không phát thải CO_2 khi hoạt động. Mặt khác hiệu suất hoạt động của chúng có thể đạt trên 90% [3]. Hiện nay, việc phổ biến loại xe này còn có những rào cản như: mật độ năng lượng của pin và phạm vi hoạt động của xe thấp; hạ tầng sạc pin còn thiếu; giá thành xe cao. HEV đang được quan tâm lớn và xem là bước chuyển hiệu quả tiến tới sử dụng hoàn toàn BEV. HEV sử dụng tối ưu hai nguồn động lực từ động cơ đốt trong và mô tơ điện. Tùy thuộc quan điểm thiết kế, tính năng vận hành, xe HEV có các hệ truyền động phổ biến bao gồm: nối tiếp; song song; nối tiếp - song song; phức hợp.

Một cách phân loại ô tô điện theo mức độ điện hóa như thể hiện trên hình 1.

Theo sự phân loại có: hybrid nhỏ (mHEV - micro Hybrid Electric Vehicle); hybrid nhẹ (MHEV - Mild Hybrid Electric Vehicle); hybrid hoàn toàn (FHEV - Full Hybrid Electric Vehicle) và hybrid giắc cắm (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle) [2]. Mức độ điện hóa của mHEV là thấp nhất, mô tơ điện không bổ sung mô men quay tới các bánh xe. MHEV có sự bổ sung mô men quay từ mô tơ điện chiếm 10% và FHEV chiếm trên 40% [4].



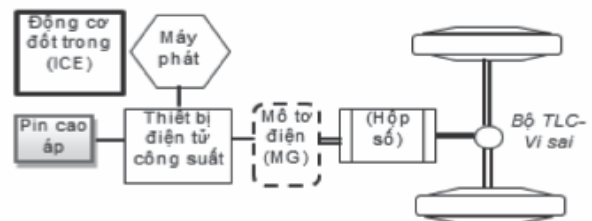
Hình 1. Phân loại ô tô điện (BEV, HEV)

Việc nghiên cứu phân tích so sánh các cấu trúc truyền động của ô tô HEV giúp sử dụng phương tiện một cách hiệu quả, an toàn, tiết kiệm nhiên liệu và có thể phục vụ cho những hướng nghiên cứu sâu tiếp theo.

2. CÁC CẤU HÌNH TRUYỀN LỰC CỦA HEV

2.1. Truyền lực hybrid nối tiếp

Sơ đồ khối các bộ phận cơ bản của truyền lực nối tiếp như thể hiện trên hình 2 [2].



Hình 2. Truyền lực Hybrid nối tiếp

Cấu trúc bao gồm: tổ hợp ICE và máy phát điện, mô tơ điện, pin cao áp, bộ truyền động giảm tốc cơ khí tới bánh xe, bộ chuyển đổi điện.

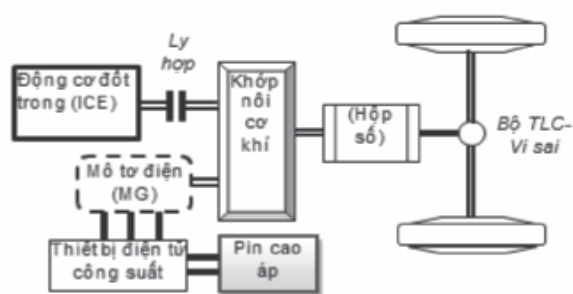
Trong cấu hình này, ICE chỉ có chức năng dẫn động máy phát để cung cấp điện trực tiếp cho mô tơ điện hoặc nạp ắc quy. Điều này có nghĩa duy nhất mô tơ điện đảm bảo 100% 

công suất yêu cầu để dẫn động các bánh xe chủ động. Mặt khác mô tơ điện có thể hoạt động ở chế độ máy phát để thu hồi năng lượng từ quá trình phanh (phanh tái sinh), sạc lại điện cho pin. Nguồn năng lượng cung cấp cho mô tơ điện có thể trực tiếp từ máy phát hoặc pin cao áp. ICE có thể không hoạt động ở một số trường hợp: dừng và khởi hành liên tục (chờ đèn tín hiệu giao thông); không tải; xuống dốc. Khác với ICEV, tốc độ quay của ICE có thể độc lập hoàn toàn đối với vận tốc của ô tô, cho phép ICE hoạt động ở vùng hiệu suất tối ưu.

Cấu hình nối tiếp có phạm vi ứng dụng hạn chế hơn so với các cấu hình khác, một số ít ứng dụng trên ô tô buýt điện. Ngoài ra, cấu hình này còn được sử dụng với xe điện mở rộng phạm vi hoạt động (EREV - Extended Range Electric Vehicle), ICE chỉ dùng để chạy máy phát sạc pin [5, 6].

2.2. Truyền lực hybrid song song

Sơ đồ khối các bộ phận cơ bản của truyền lực song song như thể hiện trên hình 3 [2].



Hình 3. Truyền lực Hybrid song song

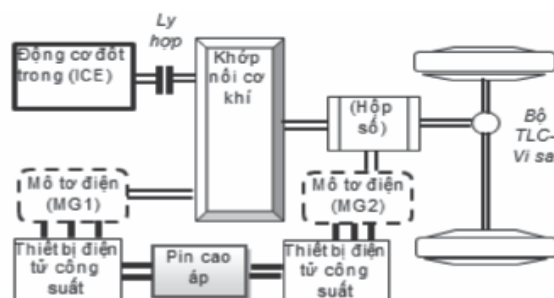
Trong cấu hình Hybrid song song, ICE và mô-tơ điện (MG) đều có khả năng truyền động trực tiếp đến bánh xe. Điều này cho phép xe vận hành linh hoạt: ICE hoạt động tương tự xe truyền thống, MG cung cấp lực kéo một

cách riêng biệt hoặc phối hợp với ICE để tối ưu hiệu suất và tiết kiệm nhiên liệu. Bộ phận quan trọng khác biệt trong cấu hình này là khớp nối cơ khí. Chúng đóng vai trò thiết yếu trong việc kết hợp ICE và mô tơ điện. Có hai loại khớp nối chính: khớp nối mô men và khớp nối tốc độ. Khớp nối mô men, thường là bộ truyền bánh răng cố định trục, thực hiện chức năng tổng hợp mô men từ ICE và mô tơ điện, truyền đến bánh xe chủ động. Ngược lại, khớp nối tốc độ, có thể là bộ truyền bánh răng hành tinh hoặc chính mô tơ điện, đảm nhiệm việc điều phối tốc độ giữa ICE và mô tơ điện, tối ưu hóa hiệu suất hoạt động của hệ thống.

Khác với HEV sử dụng cấu hình nối tiếp, khi sử dụng cấu hình song song thường vẫn sử dụng hộp số truyền thống, ví dụ hộp số 6 đến 9 cấp. MG có thể được sử dụng để hỗ trợ ICE khi xe cần tăng tốc nhanh hoặc điều chỉnh công suất đầu ra của ICE tương thích với chế độ vận hành yêu cầu [5].

2.3. Truyền lực hybrid nối tiếp- song song

Sơ đồ khối các bộ phận cơ bản của truyền lực nối tiếp - song song như thể hiện trên hình 4 [2].



Hình 4. Truyền lực Hybrid nối tiếp - song song

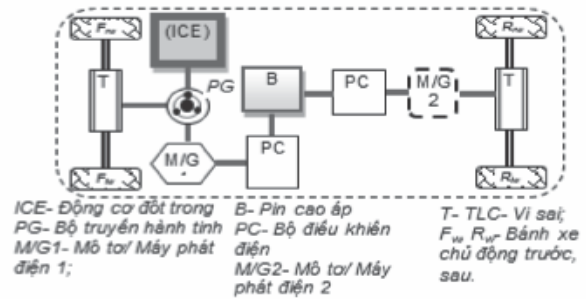
Cấu hình nối tiếp - song song kết hợp ưu điểm của cả hai cấu hình nối tiếp và song song. Chúng có khả năng thích ứng với đa dạng

các điều kiện làm việc, từ đó cải thiện hiệu suất hoạt động của hệ thống. Bộ phận quan trọng của cấu hình này là bộ chia công suất (khớp nối mô men - tốc độ). Khớp nối cho phép tách rời truyền lực từ ICE tới bánh xe trong một số chế độ vận hành, giúp ICE hoạt động ở vùng hiệu suất tối ưu (tương tự như cấu hình nối tiếp). Mặt khác, công suất từ ICE có thể được truyền trực tiếp đến bánh xe, như cấu hình song song. Khớp nối này thường sử dụng tổ hợp các bộ truyền bánh răng. Sự kết hợp này mở rộng dải hoạt động hiệu quả của xe trên toàn bộ phạm vi tốc độ. Tuy nhiên, hệ thống này đòi hỏi thuật toán điều khiển phức tạp và chi phí sản xuất cao [6]. Cấu hình này phổ biến trên các xe HEV hiện nay và được nhiều nhà sản xuất ô tô phát triển với các xe như: Toyota THS, Honda i-MMD, và BYD DM-i. Chúng cho thấy hiệu quả đáng kể trong việc tiết kiệm nhiên liệu và cải thiện hiệu suất tổng thể của xe.

2.4. Truyền lực hybrid phức hợp

Hệ truyền động Hybrid phức hợp ứng dụng trên xe dẫn động 4 bánh (4WD), là sự kết hợp giữa cấu hình nối tiếp - song song và thuần điện. Hai cấu trúc phổ biến bao gồm: trực trước Hybrid/trực sau thuần điện và ngược lại. Ưu điểm: Tối ưu lực kéo và hiệu suất nhờ dẫn động 4 bánh; Vận hành linh hoạt với hiệu suất cao; Giảm phát thải nhờ chế độ thuần điện; Tăng cường khả năng phanh tái sinh trên cả 4 bánh. Nhược điểm lớn nhất là cấu trúc và hệ thống điều khiển phức tạp [2, 6].

Sơ đồ khối các bộ phận cơ bản của truyền lực phức hợp như thể hiện trên hình 5 [2].



Hình 5. Truyền lực Hybrid phức hợp

3. SO SÁNH CÁC CẤU HÌNH TRUYỀN LỰC CỦA HEV

Để đánh giá toàn diện các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả hoạt động của HEV và so sánh giữa các cấu hình truyền động, nghiên cứu này đề xuất hai nhóm tiêu chí chính: Hiệu năng; hiệu suất và độ tin cậy vận hành [7, 8, 9, 10].

1) Hiệu năng: Nhóm này tập trung vào các thông số liên quan đến công suất, tính linh hoạt và hiệu quả sử dụng năng lượng của HEV, bao gồm:

- Tỷ lệ hỗ trợ công suất giữa MG và ICE: Phản ánh mức độ hỗ trợ của MG cho ICE, liên quan tới khả năng tăng tốc và điều kiện vận hành khác nhau.

- Chế độ vận hành: Đánh giá khả năng chuyển đổi linh hoạt giữa các chế độ (thuần điện, hybrid, thuần ICE), ảnh hưởng đến hiệu suất và khả năng thích ứng của xe.

- Hiệu suất truyền động: Đo lường tổn thất năng lượng trong quá trình truyền lực, ảnh hưởng đến hiệu quả sử dụng năng lượng và khả năng vận hành của xe.

- Dung lượng và kích thước ắc quy: Xác định phạm vi hoạt động ở chế độ điện và khả năng cung cấp năng lượng cho mô tơ.

2) Hiệu suất và độ tin cậy vận hành: Nhóm này tập trung vào hiệu quả tổng thể của hệ thống, bao gồm chi phí, độ phức tạp và tác động đến môi trường, bao gồm:

- Hiệu quả nhiên liệu và phát thải: Đánh giá mức tiêu thụ nhiên liệu và lượng khí thải, phản ánh tính kinh tế và tác động đến môi trường của xe.

- Chi phí sản xuất và vận hành: Xác định giá thành và chi phí vận hành xe.

- Độ phức tạp hệ thống: Đánh giá độ tin cậy, khả năng bảo trì và chi phí sửa chữa của xe.

Một số so sánh với các chỉ tiêu nói trên của các cấu hình truyền lực HEV thể hiện trên bảng 1, 2, 3.

Bảng 1. So sánh tỷ lệ công suất, thời gian hoạt động của ICE và MG [7, 8, 9, 10]

Thông số	Truyền lực nối tiếp	Truyền lực song song	Truyền lực nối tiếp - song song
Tỷ lệ công suất	MG: 100%, ICE: chỉ phát điện	ICE: Chủ yếu, MG: Hỗ trợ	Thay đổi linh hoạt, tùy chế độ hoạt động
Thời gian hoạt động ICE	Liên tục hoặc gần như liên tục để cung cấp năng lượng cho máy phát điện.	Phần lớn thời gian, đặc biệt ở tốc độ cao.	Có thể tắt hoàn toàn ở tốc độ thấp, hoạt động tối ưu khi xe chạy đường dài.
Thời gian hoạt động MG	Luôn hoạt động để dẫn động bánh xe.	Hỗ trợ ICE khi xe tăng tốc, leo dốc, tái tạo năng lượng.	Dẫn động xe ở tốc độ thấp, hỗ trợ ICE khi cần công suất lớn, và tái tạo năng lượng khi phanh.

Bảng 2. So sánh về mức tiết kiệm nhiên liệu, giảm phát thải các cấu hình truyền động HEV [7, 8, 9, 10]

Thông số	Truyền lực nối tiếp	Truyền lực song song	Truyền lực nối tiếp - song song
Tiết kiệm nhiên liệu	Tiết kiệm nhiên liệu đáng kể trong điều kiện vận hành đô thị (ICE hoạt động ở chế độ tối ưu);	Tiết kiệm nhiên liệu tốt trên đường trường, (ICE truyền trực tiếp công suất tới bánh xe).	Tiết kiệm nhiên liệu tốt, nhờ khả năng chuyển đổi linh hoạt giữa chế độ nối tiếp và song song.
Giảm phát thải	Giảm phát thải tốt (ICE hoạt động ở chế độ tối ưu, ít thay đổi).	Giảm phát thải, đặc biệt khi kết hợp với mô tơ điện để tăng tốc.	Giảm phát thải, nhờ khả năng tối ưu hóa hoạt động của cả ICE và mô tơ điện.
Vận hành	Hiệu quả cao khi di chuyển trong phố, có thể kém hơn trên đường ngoài đô thị.	Tính linh hoạt cao, phù hợp với nhiều điều kiện vận hành.	Phức tạp hơn về mặt cấu trúc và điều khiển, nhưng mang lại hiệu quả cao.

Bảng 3. So sánh ưu, nhược điểm các cấu hình truyền động HEV [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]

Truyền lực HEV	Ưu điểm	Nhược điểm	Phân tích
Nối tiếp	- Hệ thống đơn giản, ít thành phần cơ khí;	- Tổn thất năng lượng lớn do phải chuyển đổi năng lượng nhiều lần: từ nhiệt năng sang điện năng, từ điện năng sang động năng. - Cần mô tơ điện có công suất lớn để đáp ứng yêu cầu vận hành.	- ICE hoạt động chỉ lái máy phát điện, có thể hoạt động ở số vòng quay không đổi với mức tiêu thụ nhiên liệu thấp nhất, không phụ thuộc vào vận tốc thực tế của ô tô. Điều này nâng cao hiệu suất của ICE (có thể đạt gần giới hạn lý thuyết xấp xỉ 37%, với ICEV đạt dưới 30%). Việc chuyển đổi năng lượng nhiều lần làm giảm hiệu suất tổng thể.
Song song	Công suất truyền trực tiếp từ ICE đến bánh xe, giảm tổn thất so với loại nối tiếp	- Cấu trúc phức tạp hơn kiểu nối tiếp, cần các ly hợp và khớp nối cơ khí để kết nối và ngắt ICE và mô tơ điện - Hiệu suất của ICE có thể không tối ưu so với cấu hình nối tiếp vì phải thay đổi tốc độ theo yêu cầu vận hành.	- Cấu hình này hiệu quả hơn trên đường cao tốc so với cấu hình nối tiếp vì không cần biến đổi cơ năng của ICE thành điện năng. Tuy nhiên, hiệu suất tổng thể phụ thuộc vào việc điều khiển phối hợp giữa ICE và mô tơ điện. Khi chỉ một nguồn động lực làm việc, nguồn động lực còn lại hoạt động ở chế độ không tải hoặc không hoạt động.
Nối tiếp - song song	Kết hợp ưu điểm của cả hai cấu hình nối tiếp và song song, cho phép tối ưu hóa hiệu suất truyền động trong nhiều điều kiện vận hành.	- Cấu trúc phức tạp đòi hỏi hệ thống điều khiển phức tạp để quản lý tối ưu các nguồn động lực. - Hiệu suất trung bình của ICE có thể thấp hơn so với loại nối tiếp nhưng cao hơn loại song song.	Có khả năng chuyển đổi linh hoạt giữa chế độ nối tiếp và song song và có thể tách rời truyền lực ICE tới bánh xe đáp ứng công suất đầu ra, qua đó tối ưu hóa lượng tiêu hao nhiên liệu. Trong hệ thống có thể xảy ra hiện tượng tuần hoàn công suất, dẫn đến tổn thất và làm giảm hiệu suất của hệ thống.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này phân tích toàn diện các cấu hình truyền lực ô tô Hybrid phổ biến hiện nay bao gồm: nối tiếp, song song, nối tiếp-song song và phức hợp. Mỗi cấu hình được đánh giá dựa trên các tiêu chí hiệu năng và hiệu suất vận hành, nhằm làm rõ ưu nhược điểm và phạm vi ứng dụng. Kết quả phân tích cho thấy:

Cấu hình nối tiếp phát huy tốt trong vận hành ở dải tốc độ thấp, hiệu suất của ICE được

tối ưu hoá thông qua việc tách biệt cơ học với bánh xe. Tuy nhiên, hiệu suất tổng thể bị ảnh hưởng bởi quá trình chuyển đổi năng lượng nhiều giai đoạn.

Cấu hình song song cho hiệu suất cao ở dải tốc độ cao và khả năng truyền công suất trực tiếp từ ICE đến bánh xe. Tuy nhiên, sự phức tạp của hệ thống cơ khí và hiệu suất hạn chế ở dải tốc độ thấp là những nhược điểm của cấu hình này.



Cấu hình nối tiếp - song song phát huy hiệu quả linh hoạt và hiệu suất tối ưu trên phạm vi vận hành rộng, nhờ kết hợp ưu điểm của cả hai cấu hình trên. Tuy nhiên, hệ thống điều khiển phức tạp và chi phí sản xuất cao.

Cấu hình phức hợp có tích hợp hệ thống dẫn động thuần điện độc lập cho một trục, mở rộng phạm vi ứng dụng cho xe dẫn động bốn bánh, tối ưu hóa lực kéo và hiệu suất. Tuy nhiên, cấu trúc phức tạp và đòi hỏi yêu cầu cao về hệ thống điều khiển.

Nghiên cứu cũng đề xuất các tiêu chí đánh giá hiệu năng và hiệu suất vận hành, bao gồm tỷ lệ công suất ICE/MG, chế độ vận hành, hiệu suất truyền động, dung lượng ắc quy, hiệu quả nhiên liệu, chi phí và độ phức tạp hệ thống. Kết quả so sánh cho thấy mỗi cấu hình có những ưu nhược điểm khác nhau. Những phân tích so sánh này có thể cung cấp các thông tin kỹ thuật, công nghệ cần thiết liên quan đến các thành phần của hệ truyền động. Mặt khác, có thể được xem là tài liệu nghiên cứu tổng quan cho các lĩnh vực liên quan tới công nghệ truyền lực HEV. ❖

Ngày nhận bài: **15/4/2025**

Ngày phản biện: **05/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. TS. Nguyễn Hùng Mạnh, “*Công nghệ ô tô điện; Quyển 1 - Nhận dạng và sử dụng ô tô điện an toàn*”. NXB. Xây dựng, 2024.
- [2]. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, “*Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles*”. CRC Press - USA, 3rd Edition, 2018.
- [3]. M. Zhang, P. Suntharalingam, Y. Yang, and W. Jiang, “*Fundamentals of Hybrid Electric Powertrains*”. Advanced Electric Drive Vehicles, CRC Press, 2014.
- [4]. Amir Khajepour, Saber Fallah, Avesta Goodarzi, “*Electric and Hybrid Vehicles Technologies, Modeling and Control: A Mechatronic Approach*”. John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [5]. Huijun Yue, Jinyu Lin, Peng Dong, Zhinan Chen, Xiangyang Xu, “*Configurations and Control Strategies of Hybrid Powertrain Systems*”. Energies 2023, 16, 725. <https://doi.org/10.3390/>.
- [6]. Mohammad Shahroz, “*A Review on Hybrid Electric Vehicle Powertrains*”. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Vol 8, 2020.
- [7]. Krishna Veer Singh, Hari Om Bansal, Dheerendra Singh, “*A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components*”. J. Mod. Transport. 27, 77-107 (2019).
- [8]. Rogelio León, Christian Montaleza, José Luis Maldonado, Marcos Tostado-Véliz, Francisco Jurado, “*Hybrid Electric Vehicles: A Review of Existing Configurations and Thermodynamic Cycles*”. Thermo 1(2):134-150.
- [9]. Ganta Yamini, Vasupalli Manoj, Darla Naga Sai Krishna, “*Hybrid Electric Vehicles, Architecture and Components: A Comprehensive Review*”. International Journal of Research Publication and Reviews, Vol 3, no 10, pp 614-622, October 2022.
- [10]. Huijun Yue, Jinyu Lin, Peng Dong, Zhinan Chen, Xiangyang Xu, “*Configurations and Control Strategies of Hybrid Powertrain Systems*”. Energies 2023, 16(2), 725.
- [11]. Priti Dinkar Dhigare, Dr. Sanjay, D. Yadav, “*A Review of Hybrid Electric Vehicle: A Trend and Advanced Technologies*”. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 07 Issue: 05, 2020.