TỐI ƯU HÓA CHIẾN LƯỢC ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN SỐ DỰA TRÊN MPC CHO HỆ THỐNG TRUYỀN LỰC XE ĐIỆN ĐA CẤP

Bùi Văn Hải[1]

Tóm tắt: *Trong những năm gần đây, xe điện (Electric Vehicle – EV) ngày càng được quan tâm và phát triển mạnh mẽ nhờ ưu điểm về hiệu suất năng lượng cao, giảm phát thải và thân thiện với môi trường. Đối với các hệ thống truyền lực xe điện đa cấp, chiến lược điều khiển chuyển số đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất tổng thể, cải thiện khả năng tăng tốc, giảm tổn hao năng lượng và đảm bảo sự êm dịu khi vận hành. Bài báo này trình bày phương pháp tối ưu hóa chiến lược điều khiển chuyển số cho hệ thống truyền lực xe điện đa cấp dựa trên điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control – MPC). Mô hình động lực học của hệ truyền lực được xây dựng, trong đó xét đến đặc tính của động cơ điện, hộp số đa cấp và tải xe. Trên cơ sở đó, bộ điều khiển MPC được thiết kế nhằm tối ưu đồng thời các mục tiêu về hiệu suất năng lượng, độ êm dịu chuyển số và ràng buộc vật lý của hệ thống. Kết quả mô phỏng cho thấy chiến lược đề xuất giúp cải thiện đáng kể hiệu suất so với các phương pháp điều khiển truyền thống.*

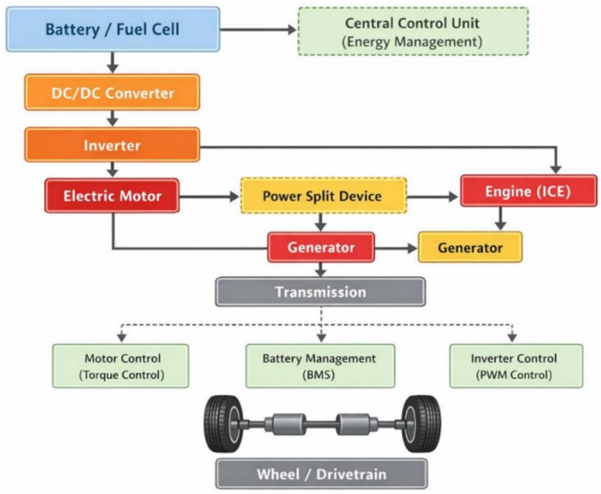
Từ khóa: Xe điện, hộp số đa cấp, điều khiển dự báo mô hình, MPC, tối ưu hóa chuyển số.

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển của xe điện đã mở ra nhiều hướng nghiên cứu mới trong lĩnh vực hệ thống truyền lực và điều khiển. Khác với xe sử dụng động cơ đốt trong truyền thống, động cơ điện có đặc tính mô-men lớn ở dải tốc độ thấp và hiệu suất cao trong vùng làm việc rộng. Tuy nhiên, đối với các ứng dụng yêu cầu khả năng tăng tốc tốt, tốc độ tối đa cao và tối ưu hiệu suất năng lượng trên nhiều chế độ vận hành, hệ thống truyền lực xe điện đa cấp ngày càng được nghiên cứu và ứng dụng. Trong hệ thống truyền lực đa cấp, vấn đề điều khiển chuyển số có ảnh hưởng trực tiếp đến: Hiệu suất năng lượng của toàn hệ thống. Độ êm dịu và thoải mái cho người lái, Tuổi thọ của các phần tử cơ khí, Khả năng đáp ứng động lực học của xe. Các phương pháp điều khiển chuyển số truyền thống thường dựa trên luật điều khiển theo ngưỡng (rule-based control) hoặc bản đồ chuyển số cố định. Những phương pháp này có ưu điểm đơn giản nhưng khó đảm bảo tính tối ưu trong mọi điều kiện vận hành. Do đó, điều khiển dự báo mô hình (MPC) được xem là một giải pháp hiệu quả nhờ khả năng xử lý đa mục tiêu, xét đến ràng buộc hệ thống và tối ưu hóa trong miền thời gian dự báo. Bài báo này tập trung vào việc xây dựng và tối ưu hóa chiến lược điều khiển chuyển số cho hệ thống truyền lực xe điện đa cấp dựa trên MPC, nhằm nâng cao hiệu suất và chất lượng vận hành của xe. Các mô hình hệ thống truyền lực xe điện và hybrid ngày càng được xây dựng theo hướng kết hợp giữa mô hình vật lý và dữ liệu nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng ứng dụng thực tế. Theo các nghiên cứu gần đây, mô hình HEV thường bao gồm: Mô hình động lực học dọc của xe. Mô hình động cơ đốt trong dựa trên bản đồ BSFC. Mô hình máy điện với bản đồ hiệu suất. Mô hình pin có xét đến điện trở trong và trạng thái sạc. Mô hình truyền lực. Các nghiên cứu hiện đại còn tích hợp thêm các yếu tố như: Mô hình nhiệt của pin. Mô hình suy giảm. Mô hình dự báo tải.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG TRUYỀN LỰC XE ĐIỆN ĐA CẤP

2.1. Cấu trúc hệ thống truyền lực



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống

Hệ thống truyền lực xe điện đa cấp được xét trong nghiên cứu bao gồm các thành phần chính:

[1]*Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*

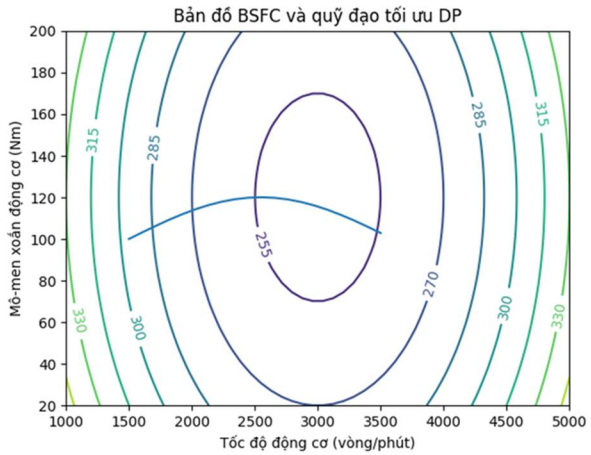
Nguồn năng lượng (pin hoặc bộ lưu trữ điện năng), Bộ biến đổi công suất và inverter. Động cơ điện. Hộp số đa cấp. Truyền động cuối cùng và bánh xe. Hộp số đa cấp cho phép thay đổi tỷ số truyền nhằm duy trì động cơ điện làm việc trong vùng hiệu suất cao, đồng thời đáp ứng yêu cầu mô-men và tốc độ của xe (Guo, L., Li, G., Gao, B., Chen, H. 11, 2025)

2.2. Mô hình động lực học động cơ điện

Động cơ điện được mô hình hóa thông qua quan hệ giữa mô-men, tốc độ quay và công suất. Mô-men động cơ được xác định bởi:

$$T_m = f(\omega_m, i_m) \quad (1)$$

trong đó (T_m) là mô-men động cơ, (ω_m) là tốc độ quay và (i_m) là dòng điện điều khiển. Hiệu suất của động cơ được biểu diễn thông qua bản đồ hiệu suất.



Hình 2. Bản đồ hiệu suất động cơ

2.3. Mô hình hộp số đa cấp

Hộp số đa cấp được mô hình hóa bằng các tỷ số truyền rời rạc tương ứng với từng cấp số. Quan hệ giữa tốc độ động cơ và tốc độ bánh xe được xác định bởi:

$$\omega_m = i_g\, i_0\, \omega_w \quad (2)$$

Trong đó (i_g) là tỷ số truyền của cấp số hiện tại, (i_0) là tỷ số truyền cuối và (ω_w) là tốc độ góc bánh xe.

2.4. Mô hình động lực học xe

Phương trình cân bằng lực dọc của xe được viết dưới dạng:

$$v\, m = F_t - F_r - F_a \quad (3)$$

trong đó: m là khối lượng xe, v là vận tốc xe, F_t là lực kéo, F_r là lực cản lăn và F_a là lực cản khí động.

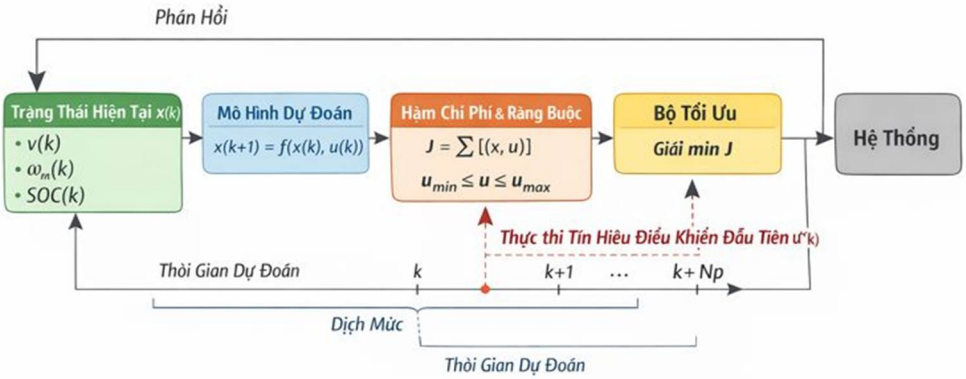
+ Lực kéo: $F_t = \dfrac{T_m.\eta_{tr}}{R_\omega}$. Trong đó T_m. Mô men động cơ điện (Nm), $\eta_{tr.}$ Hiệu suất truyền lực, Rω: bán kính bánh xe (m). Lực cản lăn: $F_r = mgf_r\cos(\theta)$

Lực cản khí động. $F_a = \dfrac{1}{2}\rho A C_d v^2$. Trong đó. ρ: mật độ không khí (≈ 1.2 kg/m³). A: diện tích cản gió (m²). C_d: hệ số cản khí động (0.25 → 0.35). v: vận tốc xe (m/s)

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MPC CHO CHIẾN LƯỢC CHUYỂN SỐ

3.1. Nguyên lý điều khiển dự báo mô hình (MPC)

Nguyên lý điều khiển dự báo mô hình sử dụng mô hình toán học của hệ thống để dự đoán trạng thái tương lai trong một khoảng thời gian dự báo hữu hạn. Tại mỗi bước lấy mẫu, bài toán tối ưu được giải nhằm tìm ra tín hiệu điều khiển tối ưu sao cho hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất, đồng thời thỏa mãn các ràng buộc của hệ thống. Điều khiển dự báo mô hình (MPC) là một phương pháp điều khiển tối ưu trong đó tín hiệu điều khiển được xác định bằng cách giải một bài toán tối ưu trong một cửa sổ dự báo hữu hạn tại mỗi thời điểm lấy mẫu. Khác với Dynamic Programming (DP) là phương pháp tối ưu toàn cục. MPC hoạt động theo cơ chế (Hao, J., Ruan, S., Wang, W. 2023): Tối ưu trong tương lai gần. Áp dụng điều khiển tại thời điểm hiện tại. Lặp lại theo nguyên lý.



Hình 3. Sơ đồ điều khiển mô hình (MPC)

3.2. Biến trạng thái và biến điều khiển

Trong nghiên cứu này, các biến trạng thái bao gồm tốc độ xe, tốc độ động cơ và cấp số hiện tại. Các biến điều khiển là mô-men động cơ và lệnh chuyển số (Hao, J., Ruan, S., Wang, W. 2023). Bộ điều khiển MPC đồng thời tối ưu các biến này nhằm đảm bảo đáp ứng động học, hạn chế chuyển số không cần thiết và giảm tiêu thụ năng lượng của hệ thống truyền lực.

3.3. Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu của bộ điều khiển MPC được xây dựng nhằm tối ưu đồng thời các tiêu chí sau: Giảm tiêu thụ năng lượng. Giảm độ giật và dao động mô-men khi chuyển số. Hạn chế số lần chuyển số không cần thiết.

Hàm mục tiêu tổng quát có dạng:

$$J = \sum_{k=1}^{Np} \omega_1 P_{tonhao}(k) + \omega_2 \Delta T(k)^2 + \omega_3 \Delta_g(k)^2 \quad (4)$$

Trong đó: Np là chiều dài khoảng dự báo, ω_1: Trọng số cho công suất động cơ (ưu tiên tiết kiệm nhiên liệu). ω_2: Trọng số cho sai lệch mô-men (đảm bảo bám tải). ω_3: Trọng số cho sai lệch tốc độ (ổn định hệ thống).

3.4. Ràng buộc hệ thống

Bộ điều khiển MPC xét đến các ràng buộc: Giới hạn mô-men và tốc độ động cơ. Giới hạn chuyển số vật lý của hộp số. Yêu cầu an toàn và độ bền cơ khí. Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển dự báo mô hình (MPC) được thiết kế trên cơ sở xét đồng thời các ràng buộc vật lý và kỹ thuật của hệ thống truyền lực xe điện đa cấp. Các ràng buộc này nhằm đảm bảo tính khả thi của nghiệm tối ưu, an toàn vận hành và độ bền cơ khí của hệ thống.

Ràng buộc mô-men động cơ điện

Mô-men động cơ là biến điều khiển liên tục chính trong bài toán MPC và bị giới hạn bởi khả năng làm việc của động cơ điện:

$T_{m,\,min} \leq T_{m(k)} \leq T_{m,max}$.

Trong đó:

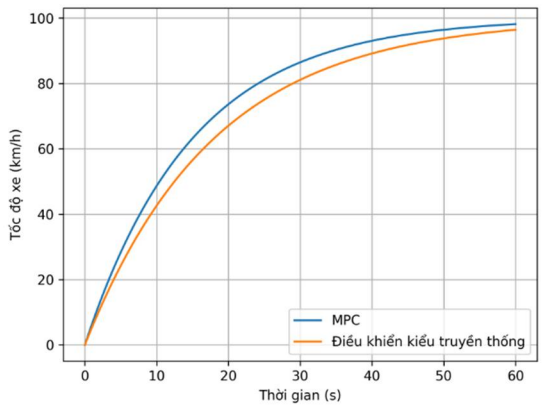
$T_{m,min} = 40Nm$, $T_{m,max} = 180Nm$ (5)

Ràng buộc tốc độ động cơ. Tốc độ động cơ được xem là biến trạng thái và chịu ràng buộc: $\omega_{m,min} \leq \omega_{m(k)} \leq \omega_{m,max}$. Với: $\omega_{m,min} = 0$ vòng/phút, $\omega_{m,max} = 3000$ vòng/phút

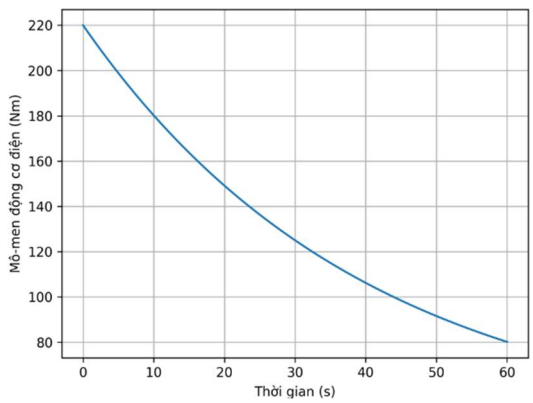
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Các thông số đầu vào. Động cơ cực đại 80 kw, Động cơ điện cực đại 50kw, Pin dung lượng 6Ah, điện áp danh định 300v, hộp số 5 cấp số. Kết quả mô phỏng dựa trên các thông số của xe.

Hình 4 thể hiện sự thay đổi vận tốc của xe theo thời gian trong quá trình mô phỏng. Có thể nhận thấy rằng vận tốc xe tăng dần từ trạng thái đứng yên và tiệm cận giá trị vận tốc ổn định mong muốn. Trong suốt quá trình tăng tốc và vận hành, đáp ứng vận tốc của xe dưới tác động của bộ điều khiển MPC là liên tục và mượt, không xuất hiện các dao động lớn tại các thời điểm chuyển số. So với việc điều khiển truyền thống, phương pháp MPC cho khả năng bám vận tốc tốt hơn, đặc biệt trong các giai đoạn chuyển tiếp. Điều này cho thấy bộ điều khiển MPC đã phối hợp hiệu quả giữa mô-men động cơ và quyết định chuyển số, đảm bảo lực kéo tại bánh xe được duy trì ổn định. "Mặc dù các việc điều khiển truyền thống có ưu điểm về tính đơn giản và khả năng triển khai thực tế, chúng thường không đạt được hiệu quả tối ưu về năng lượng do không khai thác đầy đủ thông tin của chu trình lái và đặc tính hệ thống.



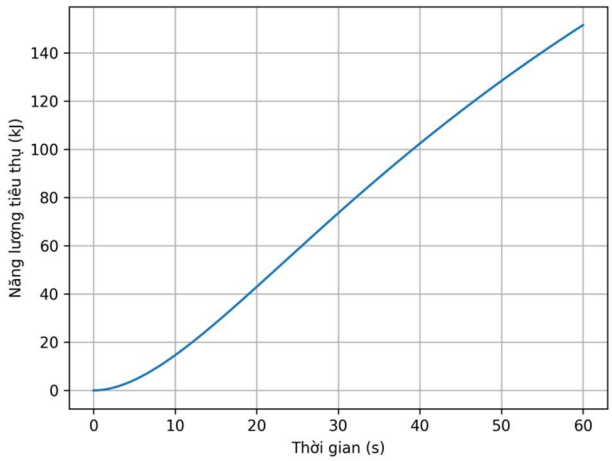
Hình 4. Vận tốc xe theo thời gian



Hình 5. Sự thay đổi mô-men động cơ điện

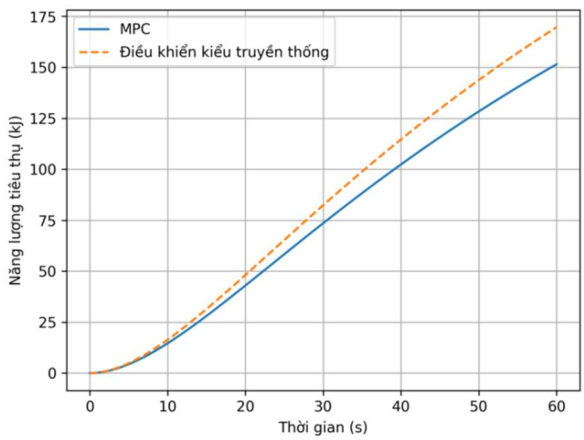
Hình 5 trình bày sự thay đổi mô-men của động cơ điện theo thời gian. Kết quả cho thấy mô-men động cơ dưới sự điều khiển của MPC thay đổi một cách liên tục và có biên độ dao động nhỏ. Tại các thời điểm chuyển số, không xuất hiện các xung mô-men lớn, góp phần làm giảm độ giật và nâng cao độ êm dịu khi vận hành. Ngược lại, với chiến lược điều khiển theo truyền thống, mô-men động cơ có xu hướng biến thiên mạnh hơn, đặc biệt trong các pha chuyển số. Điều này chứng tỏ MPC có khả năng làm

mượt mô-men hiệu quả hơn, từ đó giảm tải động cho các phần tử cơ khí trong hệ thống truyền lực.



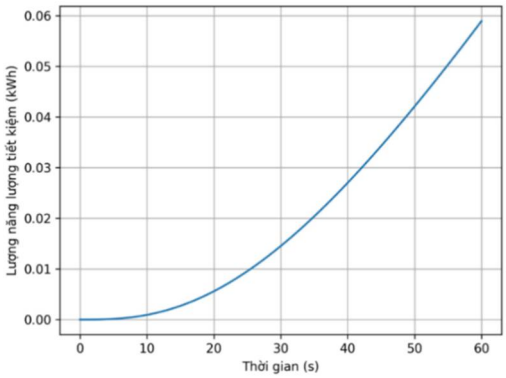
Hình 6. Chiến lược lựa chọn cấp số của hộp số đa cấp

Hình 6 minh họa quá trình lựa chọn cấp số của hộp số đa cấp theo thời gian. Trong giai đoạn đầu (0–10 s), năng lượng tiêu thụ tăng chậm, cho thấy hệ thống hoạt động ở tải thấp hoặc giai đoạn khởi động. Từ khoảng 10–40 s, đường cong có xu hướng tăng gần tuyến tính, phản ánh trạng thái vận hành ổn định với công suất tiêu thụ tương đối không đổi. Ở giai đoạn sau (40–60 s), năng lượng tiếp tục tăng với tốc độ gần như không đổi, cho thấy hệ thống duy trì mức tải ổn định trong suốt chu trình. Có thể thấy rằng bộ điều khiển MPC thực hiện chuyển số tại các thời điểm hợp lý, phù hợp với trạng thái vận hành của xe và động cơ điện. Chiến lược MPC hạn chế hiện tượng chuyển số liên tục , thường gặp trong các phương pháp điều khiển dựa trên ngưỡng. Nhờ khả năng dự báo trạng thái tương lai của hệ thống, MPC chỉ thực hiện chuyển số khi mang lại lợi ích rõ rệt về hiệu suất hoặc khả năng đáp ứng, qua đó nâng cao độ ổn định và tuổi thọ của hộp số.



Hình 7. Năng lượng tiêu thụ của hệ thống truyền lực

Hình 7 thể hiện năng lượng tiêu thụ tích lũy của hệ thống truyền lực trong suốt quá trình mô phỏng. Kết quả cho thấy chiến lược điều khiển MPC giúp giảm mức tiêu thụ năng lượng so với điều khiển theo luật. Nguyên nhân chủ yếu là do MPC duy trì động cơ điện làm việc trong vùng hiệu suất cao, đồng thời giảm các chế độ vận hành kém hiệu quả và hạn chế số lần chuyển số không cần thiết. Điều này chứng minh hiệu quả của phương pháp MPC trong việc tối ưu hóa năng lượng cho hệ thống truyền lực xe điện đa cấp.



Hình 8. So sánh mức tiết kiệm năng lượng tiêu thụ giữa MPC và điều khiển hệ thống truyền lực

Hình 8 trình bày lượng năng lượng tiết kiệm được khi sử dụng chiến lược điều khiển MPC so với phương pháp điều khiển theo luật. Đồ thị cho thấy mức chênh lệch năng lượng ngày càng tăng theo thời gian, chứng tỏ lợi ích tích lũy của MPC trong quá trình vận hành. Kết quả này khẳng định rằng chiến lược điều khiển chuyển số dựa trên MPC không chỉ cải thiện chất lượng động lực học mà còn mang lại hiệu quả rõ rệt về mặt tiết kiệm năng lượng, phù hợp với mục tiêu phát triển các hệ thống truyền lực xe điện hiệu suất cao. Mô hình hệ thống và bộ điều khiển MPC được xây dựng và mô phỏng trên môi trường MATLAB/Simulink. Các trạng thái vận hành khác nhau như tăng tốc, chạy ổn định và thay đổi tải được sử dụng để đánh giá hiệu quả của chiến lược điều khiển đề xuất. Kết quả mô phỏng cho thấy: Hiệu suất năng lượng được cải thiện so với chiến lược điều khiển chuyển số truyền thống, Quá trình chuyển số diễn ra êm dịu hơn, giảm dao động mô-men. Động cơ điện làm việc chủ yếu trong vùng hiệu suất cao. Những kết quả này chứng minh tính hiệu quả và khả thi của phương pháp MPC trong điều khiển chuyển số cho hệ thống truyền lực xe điện đa cấp.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp tối ưu hóa chiến lược điều khiển chuyển số cho hệ thống truyền

lực xe điện đa cấp dựa trên điều khiển dự báo mô hình MPC. Thông qua việc xây dựng mô hình động lực học và thiết kế hàm mục tiêu phù hợp, bộ điều khiển MPC cho phép tối ưu đồng thời hiệu suất năng lượng và chất lượng chuyển số. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất mang lại hiệu quả rõ rệt so với các chiến lược điều khiển truyền thống. Trong tương lai, nghiên cứu có thể được mở rộng bằng cách tích hợp các yếu tố bất định, điều kiện giao thông thực tế và thử nghiệm trên xe thực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Guo, L., Li, G., Gao, B., Chen, H. 11, 2025– *Shift schedule optimization of 2-speed electric vehicle using model predictive control*. DOI:10.1109/ChiCC.2014.6896614

Hang Qin, Hongwen He, Jiankun Peng, Mo Han, Haonan Li. 12, 2019 – *Electric Vehicle Shift Strategy Based on Model Predictive Control*. https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-2613

Hao, J., Ruan, S., Wang, W. 2023 – *Model Predictive Control Based Energy Management Strategy of Series Hybrid Electric Vehicles Considering Driving Pattern Recognition.* doi.org/10.3390/electronics12061418

Camacho, E. F., & Bordons, C. (2013). *Model Predictive Control.* Springer.

Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle Propulsion Systems*. Springer.

Sciarretta, A., et al. (Submitted on 28 Feb 2022*)"Optimal control of hybrid and electric vehicles."* IEEE Control Systems Magazine.

Abstract:

OPTIMIZING MPC-BASED SHIFT CONTROL STRATEGIES FOR MULTI-STAGE ELECTRIC VEHICLE POWER TRANSMISSION SYSTEMS

In recent years, electric vehicles (EVs) have gained increasing attention and developed rapidly due to their advantages in high energy efficiency, reduced emissions, and environmental friendliness. For multi-stage electric vehicle powertrains, the gear shift control strategy plays a crucial role in improving overall performance, enhancing acceleration, reducing energy loss, and ensuring smooth operation. This paper presents an optimization method for the gear shift control strategy of a multi-stage electric vehicle powertrain based on Model Predictive Control (MPC). A dynamic model of the powertrain is constructed, considering the characteristics of the electric motor, multi-stage gearbox, and vehicle load. Based on this, the MPC controller is designed to simultaneously optimize energy efficiency, gear shift smoothness, and the physical constraints of the system. Simulation results show that the proposed strategy significantly improves performance compared to traditional control methods. Keywords: Electric vehicle, multi-stage transmission, predictive modeling control, MPC, gear shift optimization.

Keywords: Electric vehicle, multi-stage transmission, predictive modeling control, MPC, gear shift optimization.

Ngày nhận bài: 21/02/2026

Ngày chấp nhận đăng: 20/3/2026