

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID TRONG TRỢ LỰC LÁI ĐIỆN TRÊN Ô TÔ

A USING PID CONTROLLER FOR VEHICLE ELECTRIC POWER STEERING SYSTEM

LÊ VĂN NGHĨA*, ĐÀM HOÀNG PHÚC, TRỊNH NHẬT TÂN,
TRẦN MINH CÔNG, LÊ VĂN TÀI, ĐẬU VĂN ĐỨC, PHẠM VĂN SANG,
ĐỖ ĐÌNH QUANG ANH, VŨ ĐÌNH HÒA

Viện Cơ khí động lực, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email liên hệ: nghia.levan@hust.edu.vn

Tóm tắt

Trên các ô tô hiện nay, quan sát thấy rằng hệ thống trợ lực lái điện (EPS) đang được sử dụng thay thế hệ thống trợ lực lái thủy lực (HPS) truyền thống. Trợ lực lái muốn tạo được cảm giác lái tốt, đảm bảo tính an toàn thì nó phải thích nghi đồng thời với vận tốc và momen trên vành tay lái. Dựa trên nguyên lý làm việc và phân tích cấu tạo của hệ thống trợ lực lái điện, bài báo đã thiết kế và đưa ra thuật toán điều khiển EPS bằng PID đáp ứng được yêu cầu về mô men trên vành lái trong các điều kiện vận hành khác nhau của ô tô. Xây dựng mô hình hệ thống trợ lực lái điện và đánh giá cảm giác lái ô tô thông qua tiêu chí mô men trên vành lái khi xe chuyển động với các vận tốc khác nhau và trong các điều kiện mặt đường khác nhau.

Từ khóa: EPS, điều khiển, mô phỏng, cảm giác lái.

Abstract

It has been observed that the electric power steering system (EPS) is being used to replace the traditional hydraulic steering assist system in today's cars (HPS). The power steering, in order to create a good driving sensation and ensure safety, must be simultaneously compatible with the vehicle speed and torque on the steering wheel. Based on the working principle and the structural analysis of the electric power system, a EPS design with the control algorithm used PID to meet the torque requirements on the steering wheel in different operating conditions of vehicle was given in this article. The EPS model was built and the driving feeling of vehicle when moving at different speeds and road conditions was evaluated.

Keywords: EPS, control, simulation, steering feel.

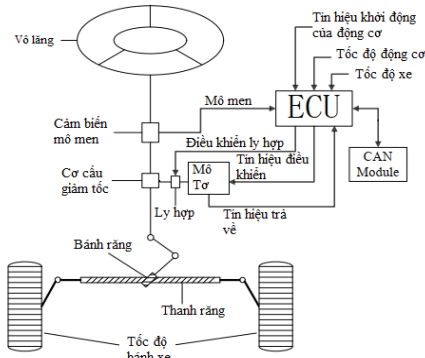
1. Đặt vấn đề

Hệ thống lái là một bộ phận quan trọng của ô tô và hoạt động của nó ảnh hưởng trực tiếp đến trải nghiệm lái xe và sự an toàn khi lái xe. Hệ thống lái ô tô đời đầu là hệ thống lái thuần túy cơ khí, không có hệ thống trợ lực và năng lượng vận hành hệ thống lái hoàn toàn do người lái cung cấp nên không có được cảm giác lái tốt vì lực đánh lái nặng và không ổn định. Vì thế, hệ thống lái có trợ lực đã ra đời và phát triển để giảm bớt công sức lao động cho con người và tạo ra cảm giác lái tốt hơn. Ngày nay trên ô tô, hệ thống lái có trợ lực chủ yếu được chia thành ba loại: hệ thống lái trợ lực thủy lực (HPS), hệ thống lái trợ lực điện thủy lực (EHPS) và hệ thống lái trợ lực điện (EPS) [1]. Trong những năm gần đây, hệ thống lái trợ lực lái thủy lực truyền thống (HPS) đã được thay thế bằng hệ thống lái trợ lực điện, vì những ưu điểm vượt trội của nó. Ưu điểm vượt trội của hệ thống lái trợ lực điện (EPS) so với trợ lực lái thủy lực (HPS) và trợ lực lái điện thủy lực (EHPS) là tạo ra cảm giác lái tốt hơn. Ngoài ra, không có hệ thống dầu thủy lực, tính kinh tế cao, dễ sửa chữa bảo dưỡng. Hệ thống trợ lực lái điện (ESP) giúp người lái điều khiển phương tiện bằng cách trợ giúp thêm mô men đánh lái cần thiết để quay vô lăng, giúp xe chuyển hướng chuyển động một cách dễ dàng hơn. Trợ lực lái muốn tạo được cảm giác lái tốt, đảm bảo tính an toàn cao thì nó phải thích ứng được với vận tốc xe (v) và mô men đánh lái của người lái [2]. Bài báo đưa ra phương pháp sử dụng bộ điều khiển PID điều khiển motor điện đáp ứng được yêu cầu của trợ lực lái theo vận tốc và điều kiện đường khác nhau. Thuật toán bộ điều khiển PID điều khiển motor bằng cách điều chỉnh điện áp cung cấp cho motor điện phù hợp để đáp ứng yêu cầu của trợ lực lái thông qua cảm biến mô men xoắn, cảm biến tốc độ, cảm biến góc đánh lái. Phương pháp mô phỏng được lựa chọn để khảo sát khả năng làm việc của bộ điều khiển PID.

2. Xây dựng mô hình trợ lực lái điện

2.1. Cấu tạo chung của hệ thống trợ lực lái điện

Hệ thống trợ lực lái điện EPS phổ thông trên xe con bao gồm các phần tử chính như sau: vô lăng lái, cảm biến momen xoắn, cảm biến vận tốc xe, bộ điều khiển điện tử (ECU), motor điện 1 chiều, ly hợp điện từ, hộp giảm tốc, bánh răng và thanh răng [2]. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống lái trợ lực điện được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống lái trợ lực điện

2.2. Mô hình tính toán các phần tử chính trong hệ thống trợ lực lái điện

Giá trị momen tại cảm biến momen lái [5]:

$$T_s = K_a(\theta_m - \theta_n) \tag{1}$$

Momen đầu vào tại trục lái:

$$T_d - T_s = J_m\ddot{\theta}_m + B_m\dot{\theta}_m \tag{2}$$

Momen đầu ra của trục lái:

$$T_s = K_a(\theta_m - \theta_n) \tag{3}$$

$$T_s + T_a - T_r = J_n\ddot{\theta}_n + B_n\dot{\theta}_n \tag{4}$$

$$T_r = K_c\theta_n \tag{5}$$

Mô hình toán motor điện như sau [5]:

Phần cơ:

$$T_n - T_a/G = J_a\ddot{\theta}_r + B_a\dot{\theta}_r \tag{6}$$

$$\theta_r = G \cdot \theta_n \tag{7}$$

$$T_n = K_i i_a \tag{8}$$

Phần điện:

$$u = Ri_a + Li_a + K_e\dot{\theta}_r \tag{9}$$

Trong đó: T_s là giá trị đầu ra cảm biến momen lái, T_d là momen đánh lái của tài xế, T_a là momen trợ lực sau khi đi qua hộp giảm tốc, T_r là momen cản của trục lái phía trước, T_n là momen xoắn nội, J_m là momen quán tính quay giữa vô lăng và đầu vào trục lái, J_n quán tính quay tổng cộng của đầu trục lái và bánh răng cơ cấu lái, J_a là momen quán tính quay motor, B_m là hệ số cản đàn hồi giữa vô lăng và đầu vào trục lái, B_a là hệ số cản đàn hồi trục motor, i_a là cường độ dòng điện cấp cho motor trợ lực, θ_m là góc xoắn vô lăng, θ_n là góc xoắn đầu ra trục lái, θ_r là góc xoắn của trục motor, R và L là điện trở và điện kháng các cuộn dây motor, G là tỷ số truyền hộp giảm tốc, K_i là hằng số momen, K_e là hằng số điện kháng.

2.3. Mô hình điều khiển EPS

Để xây dựng bộ điều khiển PID, coi hệ thống có người lái ảo, khi đó có thể xây dựng được mô hình bộ điều khiển này thông qua mô hình toán học sau đây:

$$U = (i_a^* - i_a)(K_p + K_t \frac{1}{s} + K_d s) \tag{10}$$

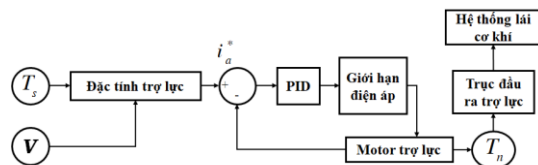
$$i_a^* = \frac{T_h}{K_i G} \tag{11}$$

Trong đó:

- i_a^* : là giá trị cường độ dòng điện mục tiêu cấp cho motor để motor sinh ra momen cần thiết trợ giúp người lái.

- K_p, K_t, K_d : là các hệ số của bộ điều khiển PID.

Bộ điều khiển PID thực hiện so sánh giá trị của dòng điện yêu cầu với giá trị dòng điện thực tế của mô tơ trợ lực, từ đó thực hiện quy tắc điều khiển bám để đưa ra giá trị ngưỡng của điện áp đưa vào điều khiển motor trợ lực. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống có bộ điều khiển PID với phản hồi kín được thể hiện trên Hình 2 và sơ đồ cấu trúc nguyên lý điều khiển hệ thống lái có trợ lực điện - EPS được trình bày chi tiết hơn ở dưới đây.

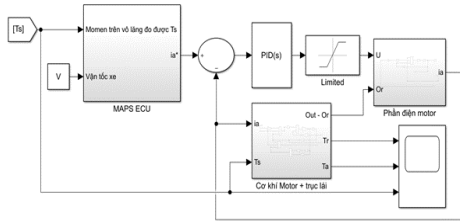


Hình 2. Mô hình điều khiển EPS

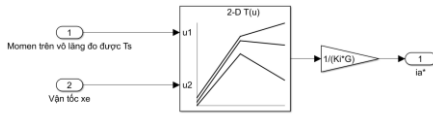
Mô hình cấu trúc điều khiển EPS dạng rút gọn được biểu diễn như Hình 3 và Hình 4.

Trong quá trình điều khiển, điện áp cung cấp cho mô tơ điện trợ lực lái được giới hạn là 12V.

Giá trị cường độ dòng điện yêu cầu được tính toán bởi block MAPS ECU với công cụ Lookup Table từ đặc tính trợ lực lái được xây dựng như sau đây.



Hình 3. Mô hình cấu trúc điều khiển EPS đơn giản



Hình 4. Mô hình MAPS ECU

3. Xây dựng đặc tính trợ lực điện

3.1. Các thông số cơ bản của hệ thống trợ lực lái điện

Đối tượng nghiên cứu được chọn là xe ô tô điện cỡ nhỏ Smart Fortwo.

Momen trợ lực cần cung cấp tính theo công thức:

$$M_{tl} = R_{vl} \cdot P_{tl} \quad (12)$$

Trong đó P_{tl} : Lực từ trợ lực lái điện hỗ trợ, bán kính vô lăng $R_{vl} = 0.2m$;

Tỷ số truyền của hộp giảm tốc tại motor điện là:

$$i_{glt} = \frac{M_{tl}}{\eta_{glt} M_m} \quad (13)$$

Theo tài liệu [2]: $i_{glt} = 15$;

Các thông số yêu cầu về mô tơ điện được tham khảo từ Đồ án tốt nghiệp thiết kế hệ thống lái xe điện cỡ nhỏ [3] như sau:

- $M_{m,max} = 1.433 \text{ Nm}$
- $W_{m,max} = 1125 \text{ vòng/phút}$
- $P_{m,max} = M_{m,max} \cdot W_{m,max} = 168.7 \text{ W}$

Thông số của motor điện lấy từ tài liệu tham khảo [4] như Bảng 1.

Bảng 1. Thông số động cơ điện

Loại motor điện	Chổi than 1 chiều
Điện áp định mức	12V
Dòng điện định mức	35A
Tốc độ vòng quay	1210 rpm
Momen xoắn	1.76 Nm

3.2. Xây dựng đặc tính trợ lực điện

Đường đặc tính trợ lực điện sẽ biểu diễn mối quan hệ giữa tín hiệu đầu vào (Momen đánh lái trên vô lăng và vận tốc xe) và tín hiệu đầu ra (Momen trợ lực hoặc cường độ dòng điện cấp cho motor trợ lực). Trong quá trình lái xe, momen cần lái trên bánh lái sẽ giảm theo sự tăng vận tốc xe, vì vậy momen trợ lực của motor điện cũng phải giảm cùng với sự tăng vận tốc xe.

Các loại đặc tính trợ lực điện có 3 loại theo biên dạng: Tuyến tính, gấp khúc và cong (như trong mô tả bên dưới). Trong đó, loại tuyến tính đơn giản và được sử dụng thông dụng nhất. Do đó bài báo sử dụng loại tuyến tính để làm đối tượng để nghiên cứu.

Để xây dựng được đường đặc tính này, trên thực tế cần một số thông số từ thí nghiệm và thực nghiệm. Ngoài ra phải kết hợp kinh nghiệm nhiều năm trong thiết kế để các hãng xe đưa ra một đường đặc tính vừa đảm bảo yêu cầu mà vẫn tạo ra sự thoải mái cho người lái (công thức 14). Trong tính toán dưới đây của bài báo sẽ tham khảo theo tài liệu [4] để xây dựng.

$$T_h = \begin{cases} 0 & \text{nếu } 0 \leq T_d \leq T_{d0} \\ f(v) \cdot (T_d - T_{d0}) & \text{nếu } T_{d0} \leq T_d \leq T_{dmax} \\ f(v) \cdot (T_{dmax} - T_{d0}) & \text{nếu } T_{dmax} \leq T_d \end{cases} \quad (14)$$

Trong đó:

- T_h : Momen xoắn yêu cầu (target) của motor điện phải cung cấp sau khi đi qua hộp giảm tốc;
- T_{hmax} : Momen xoắn cực đại của mô tơ trợ lực điện. Theo công thức (13) ta có:

$$T_{hmax} = M_{tlmax} \text{ cần thiết} = 16.12 \text{ Nm}$$

- T_{d0} : Momen đánh vô lăng từ người lái nhỏ nhất mà kể từ đó motor điện bắt đầu tạo ra momen trợ lực.

Chọn $T_{d0} = 1 \text{ Nm}$ tham khảo tài liệu [5, 6].

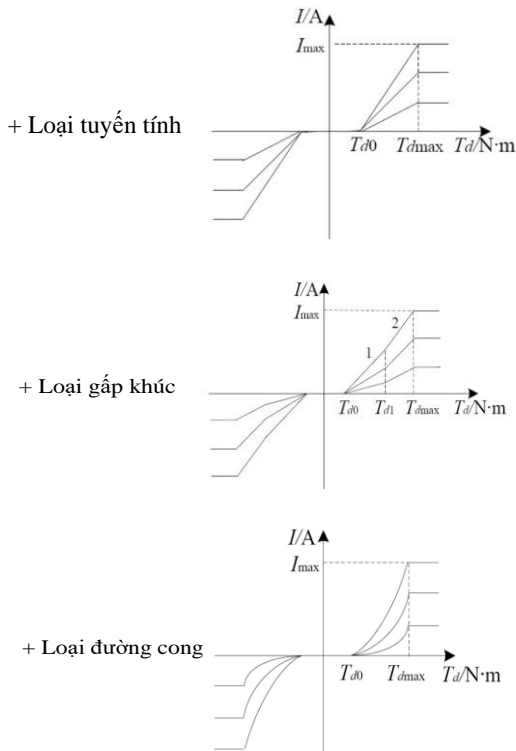
- T_{dmax} : Momen đánh vô lăng từ người lái mà khi đó motor đạt công suất lớn nhất. $T_{dmax} = 8 \text{ Nm}$ chọn theo kinh nghiệm, tham khảo tài liệu [5,6]

- $f(v)$: Hằng số tương ứng với vận tốc của xe, được xác định như trong Bảng 2.

Bảng 2. Hệ số tương ứng với các vận tốc khác nhau, được hiệu chỉnh trong thí nghiệm thực tế

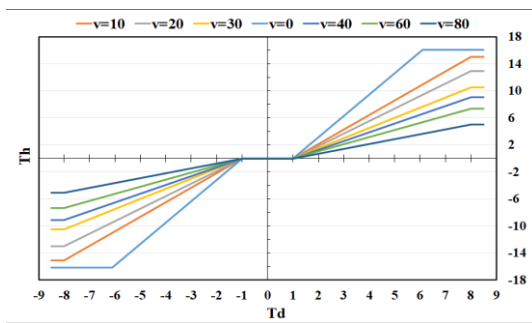
Vận tốc (km/h)	0	10	20	30	40	60	80
Hằng số $f(v)$	3,16	2,15	1,85	1,5	1,3	1,05	0,72

Các loại đặc tính trợ lực điện được biểu diễn như Hình 5.



Hình 5. Các loại đặc tính trợ lực điện

Kết hợp với công thức (14) và các giá trị trong Bảng 2 ta xây dựng được đồ thị đường đặc tính trợ lực lái như Hình 6.



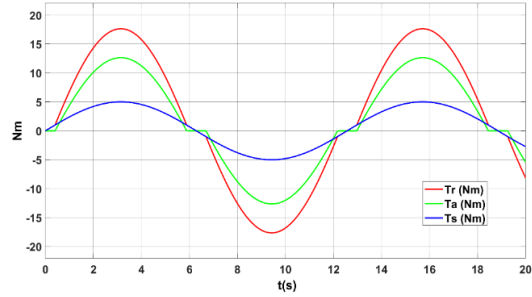
Hình 6. Đồ thị đường đặc tính trợ lực lái điện

4. Khảo sát sự đáp ứng của hệ thống trợ lực lái trong các điều kiện vận tốc khác nhau

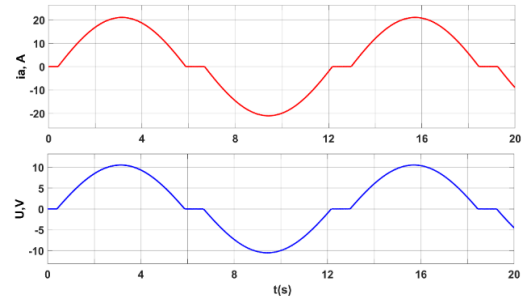
Từ những mô hình tính toán của các phần tử chính trong EPS đã được xây dựng, kết hợp với các thông số kỹ thuật thu thập được từ các tài liệu tham khảo ta tiến hành mô phỏng, và đạt được các kết quả dưới đây (Hình 7a-m, Hình 8). Để đánh giá khả năng làm việc của bộ điều khiển PID ta thực hiện các khảo sát khi giá trị Ts là dạng Sin signal và Ramp signal. Kết quả

mô phỏng trong các điều kiện vận hành khác nhau về vận tốc được thể hiện trên Hình 7a-m.

+ V = 0 (km/h):

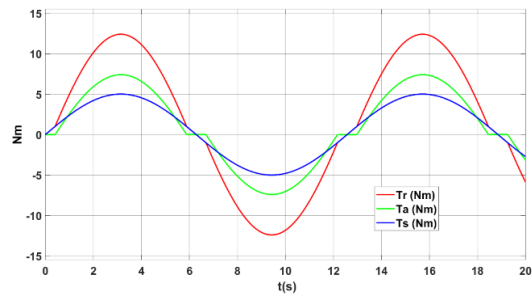


Hình 7a. Giá trị đầu vào Ts dạng "Sin signal" tại V=0 (km/h)

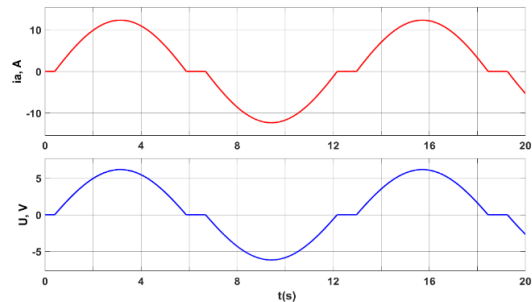


Hình 7b. Dòng điện và điện áp cấp cho motor tại V=0 (km/h)

+ V = 20 (km/h):

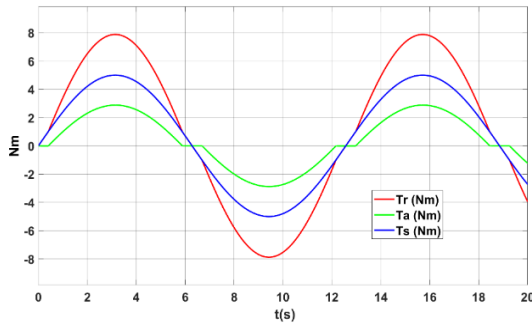


Hình 7c. Giá trị đầu vào Ts dạng "Sin signal" tại V=20 (km/h)

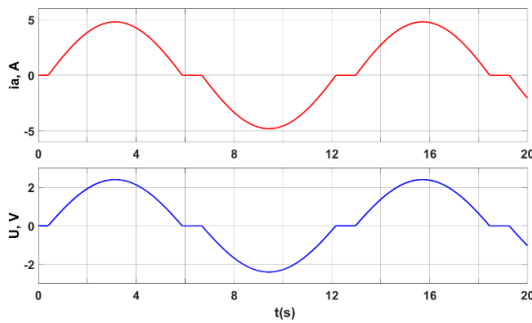


Hình 7d. Dòng điện và điện áp cấp cho motor tại V=20 (km/h)

+ $V = 80$ (km/h):

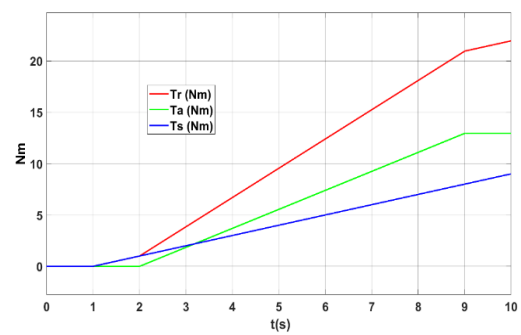


Hình 7e. Giá trị đầu vào T_s dạng “Sin signal” tại $V=80$ (km/h)

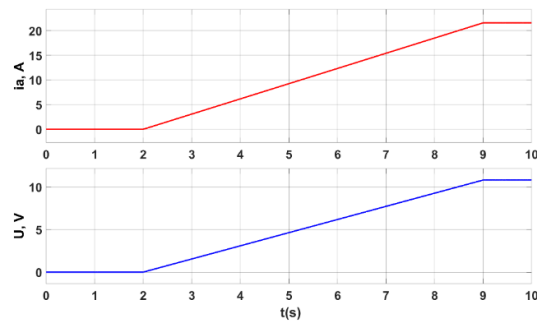


Hình 7f. Dòng điện và điện áp cấp cho motor tại $V=80$ (km/h)

+ $V = 20$ (km/h):

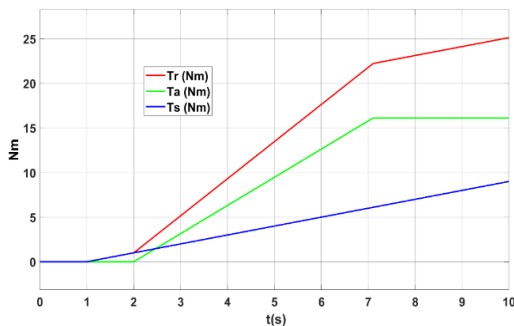


Hình 7i. Giá trị đầu vào T_s dạng “Ramp signal” tại $V=20$ (km/h)

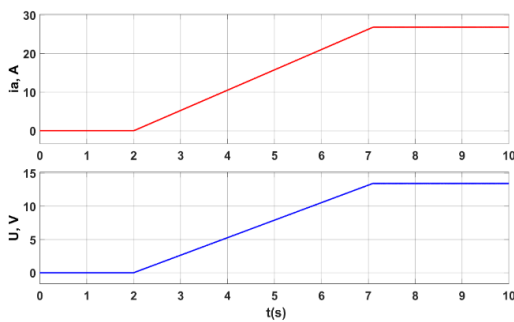


Hình 7k. Dòng điện và điện áp cấp cho motor tại $V=20$ (km/h)

+ $V = 0$ (km/h):

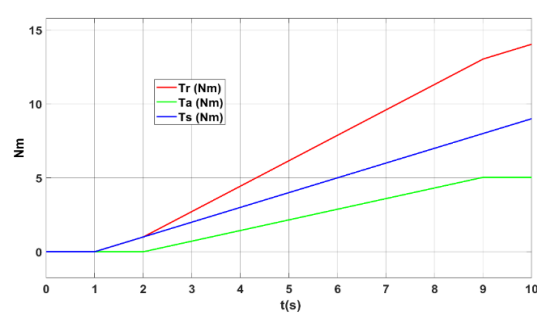


Hình 7g. Giá trị đầu vào T_s dạng “Ramp signal” tại $V=0$ (km/h)

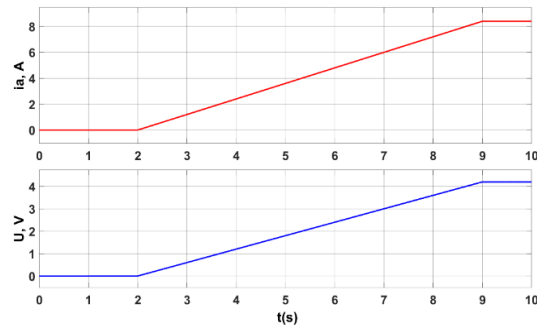


Hình 7h. Dòng điện và điện áp cấp cho motor tại $V=0$ (km/h)

+ $V = 80$ (km/h):



Hình 7n. Giá trị đầu vào T_s dạng “Ramp signal” tại $V=80$ (km/h)

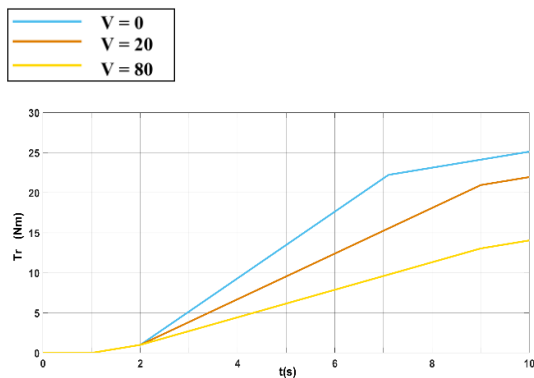


Hình 7m. Dòng điện và điện áp cấp cho motor tại $V=80$ (km/h)

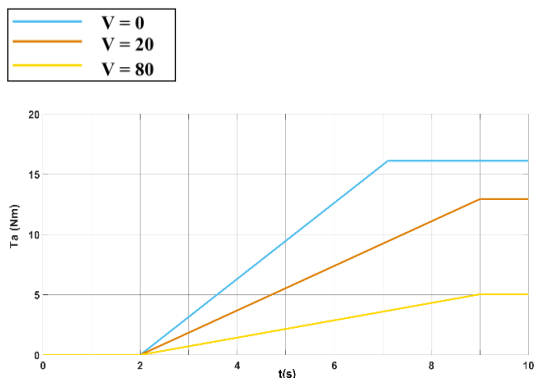
Hình 7 (a)~(f) cho thấy sự thay đổi cường độ dòng điện và điện áp cấp cho motor trợ lực thay đổi theo các vận tốc khác nhau. Tại thời điểm vận tốc $V = 0$ (km/h) cường độ dòng điện max cấp cho motor là 21,07 (A), điện áp max là 10,53 (V). Khi vận tốc $V = 20$ (km/h) thì cường độ dòng điện max giảm rõ rệt còn 12,33 (A), điện áp max lúc này còn 6,167 (V). Mức độ giảm của cường độ dòng điện được thấy rõ hơn khi xe đạt $V = 80$ (km/h), chỉ còn 4,8 (V) đối với cường độ dòng điện max và mức điện áp max chỉ 2,4 (V). Qua những kết quả trên, Vận tốc càng lớn thì cường độ dòng điện và điện áp càng giảm, điều đó đồng nghĩa momen trợ lực cũng giảm khi ở vận tốc cao. Quy luật trên hoàn toàn phù hợp với bản chất vật lý của hệ thống lái là khi vận tốc chuyển động của xe càng lớn thì momen cản lái càng nhỏ.

Các kết quả tương tự cũng nhận được trong trường hợp tín hiệu đầu vào có dạng Ramp signal như trên Hình 7g-m.

Sự thay đổi của momen đầu vào T_s theo momen cản T_r và theo momen trợ lực T_a được thể hiện trên Hình 8a-b.



Hình 8a. Đồ thị momen cản lái với các vận tốc khác nhau



Hình 8b. Đồ thị momen trợ lực với các vận tốc khác nhau

Trên Hình 8 (a)~(b), nếu lấy thí điểm tại vị trí thời gian $t = 6$ (s) khi vận tốc $V = 0$ (km/h) momen cản lái T_r có giá trị bằng 17,63 (Nm), momen trợ lực T_a có giá trị bằng 12,63 (Nm) từ đó ta tính được momen người lái $T_s = T_r - T_a = 5$ (Nm). Tương tự, khảo sát tại các khoảng vận tốc $V = 20$ (km/h), tính toán và đo được các giá trị: $T_r = 12,36$ (Nm), $T_a = 7,39$ (Nm), $T_s = 4,97$ (Nm). Đồng thời tại thời điểm đó và vận tốc $V = 80$ (km/h), các giá trị đo và tính toán được như sau: $T_r = 7,88$ (Nm), $T_a = 2,88$ (Nm), $T_s = 5$ (Nm). Qua các giá trị khảo sát và tính toán, cho thấy momen người lái thay đổi rất nhỏ dù ở các khoảng vận tốc khác nhau. Điều đó thể hiện khả năng làm việc tốt của trợ lực và cũng làm nổi bật lên ưu điểm vượt trội của trợ lực lái điện.

Từ các kết quả trên Hình 7 (a)~(m), khi các giá trị đầu vào dạng “Sin signal” và dạng “Ramp signal” momen trợ lực lái (T_a) sinh ra biến thiên theo momen cản lái (T_r) ở các tốc độ chuyển động của xe khác nhau. Có thể thấy momen của người lái (T_s) nhỏ hơn rất nhiều so với momen cản trực lái (T_r) và khi vận tốc tăng, momen cản lái giảm dần (T_r) và momen trợ lực cũng (T_a) cũng giảm dần, và T_a có thể thay đổi theo thay đổi của momen người lái (T_s) theo thời gian. Như vậy, trong quá trình lái xe có sử dụng trợ lực lái điện sẽ đảm bảo cho việc đánh lái nhẹ nhàng ở tốc độ thấp và có được cảm giác lái tốt ở tốc độ cao.

Việc tổng hợp toàn bộ kết quả mô phỏng cho thấy rằng: thuật toán điều khiển EPS dùng PID cho phép tạo ra momen trợ lực tùy biến theo các điều kiện vận tốc khác nhau của xe. Điều đó sẽ làm cho người lái xe có cảm giác lái tốt hơn và nâng cao tính an toàn chuyển động.

5. Kết luận

Trợ lực lái tốt phải đảm bảo việc đánh lái nhẹ nhàng ở các dải vận tốc khác nhau. Bài báo này đã xây dựng mô hình động lực học của hệ thống trợ lực lái điện với thuật toán điều khiển PID đáp ứng được yêu cầu về momen trên vành lái trong các dải vận tốc khác nhau của ô tô. Thông qua việc khảo sát tín hiệu momen đầu vào hệ thống lái theo các quy luật khác nhau dạng Ramp và Sin tại các giá trị vận tốc khác nhau có thể kết luận về khả năng đáp ứng của thuật toán điều khiển PID đã được xây dựng. Sự tùy biến của momen trợ lực trong khoảng từ 12,63Nm đến 2,88Nm tương ứng với các vận tốc xe từ 0km/h đến 80km/h sẽ mang lại cảm giác lái ổn định hơn cho người lái xe và nâng cao tính an toàn khi tham gia giao thông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Xiaolin Zhang and Jiming Ma, *Design and Simulation of Electric Power Steering System*, Computer Simulation.Beijing, Vol.31, pp.175-178, March 2014.
- [2] Nguyễn Trọng Hoàn, *Thiết kế tính toán ô tô*, NXB Giáo dục Việt Nam, 2019.
- [3] Trịnh Nhật Tân, *Đồ án tốt nghiệp Thiết kế hệ thống lái xe điện cỡ nhỏ*, Tài liệu lưu hành nội bộ, 2021.
- [4] G. H. S. S. Y. M. Yuji Kozaki, *Electric Power Steering (EPS)*, Steering Technology Department, Automotive Technology Center, 2020.
- [5] Y. W. Shaoyun Zhang, *Study of Electric Power Steering System*, China: International Conference on Computer Science and Intelligent Communication, 2015.
- [6] S. C. Huaiquan ZANG, *Electric Power Steering Simulation Analyze Based on Fuzzy PID*, Journal of Computational Information Systems, 2011.

Ngày nhận bài: 01/7/2021

Ngày nhận bản sửa: 05/8/2021

Ngày duyệt đăng: 15/8/2021