

TÍNH TOÁN KHẢ NĂNG PHANH TÁI SINH TRÊN Ô TÔ ĐIỆN

CALCULATION OF REGENERATIVE BRAKING FOR ELECTRIC CAR

Lê Thanh Nhân¹, Nguyễn Hữu Phước¹, Đàm Hoàng Phúc¹, Nguyễn Thành Công²

¹Khoa Cơ khí Động lực, Trường Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

TÓM TẮT

Ô tô điện có khả năng phanh tái tạo năng lượng nhưng việc sử dụng phanh tái tạo cần đảm bảo được yêu cầu an toàn của hệ thống phanh. Do vậy cần sự nghiên cứu để đánh giá khả năng phanh tái tạo để đảm bảo an toàn và có thể hấp thụ được lực phanh tái tạo nhằm tối ưu lực phanh. Từ các thông số cơ bản của xe và với các vận tốc, cường độ phanh khác nhau có thể xác định được lực phanh tái sinh trên các cầu so với lực phanh yêu cầu đối với từng chiến lược thiết kế hệ thống phanh. Việc khảo sát đánh giá trên xe Nissan Leaf cho thấy tại vận tốc nhỏ hơn 20 km/h thì phanh tái sinh đáp ứng được hoàn toàn lực phanh mà hệ thống phanh yêu cầu ở cường độ phanh từ 0,1g đến 0,6g. Khi tốc độ lên 40 km/h, lực phanh tái sinh vẫn đáp ứng được với cường độ phanh lên tới 0,5g và khi lên tới tốc độ 60 km/h thì cường độ phanh ở 0,4g vẫn đáp ứng được khi sử dụng phanh tái sinh. Hiệu quả phanh tái sinh là rất cao ở các cường độ phanh nhỏ, ví dụ ở vận tốc 20 km/h và cường độ phanh là 0,1g thì phanh tái sinh có thể đáp ứng lên tới 1200% lực phanh yêu cầu. Tuy nhiên, khi vận tốc cao thì lực phanh tái sinh giảm nhưng tại vận tốc rất cao lên tới 100 km/h và cường độ phanh 0,6g thì lực phanh tái sinh vẫn đáp ứng được 40% lực phanh yêu cầu. Lúc này, phanh ma sát chỉ cần đáp ứng 60% lực phanh yêu cầu giúp giảm áp lực lên hệ thống phanh ma sát.

Từ khóa: Phanh tái sinh; Ô tô điện; Hiệu quả phanh.

ABSTRACT

Electric vehicles are capable of regenerative braking, but the regenerative braking needs to ensure the safety requirements of the braking system. Therefore, it is necessary to study to evaluate the ability of regenerative braking to ensure safety and to be able to absorb regenerative braking force to optimize braking force. From the specification vehicle parameters, and with different speeds and braking strengths, it is possible to determine the regenerative braking force on the axle compared to the braking force required for each braking system designed strategy. The scenario of evaluation of the Nissan Leaf showed that at a speed of less than 20 km/h, the regenerative brake fully met the requirement of braking force by the braking system at the braking strength from 0.1g to 0.6g. When the speed is up to 40 km/h, the regenerative braking force is still able to meet the braking strengths of up to 0.5g and when it reaches the speed of 60 km/h, the braking strength at 0.4g is still met the requirement when used regenerative brake. The regenerative braking efficiency is tremendously high at small braking strengths, for example at 20 km/h and braking strength at 0.1g, regenerative braking can meet up to 1200% of the requirement of braking force. However, at high speeds, the regenerative braking force decreases, but at extremely high speeds up to 100 km/h and braking strength at 0.6g, the regenerative braking force still meets 40% of the requirement of braking force. Therefore, the friction brake only needs to meet 60% of the requirement of braking force leading to reducing the pressure on the friction brake system.

Keywords: Regenerative braking; Electric vehicles; Braking effectiveness.

1. GIỚI THIỆU

Hệ thống phanh trên xe điện khác với hệ thống phanh trên động cơ đốt trong khi có thêm phanh tái sinh tại cầu dẫn động. Việc tận dụng mô men phanh trên mô tơ điện vừa có thể giảm áp lực cho hệ thống phanh chính vừa có thể tận dụng mô men phanh này thành năng lượng điện sạc lại cho pin điện.

Những năm gần đây, có nhiều nghiên cứu như bài báo [1] nêu ra phương án để thu hồi tối đa lực phanh tái sinh, nghiên cứu [2] để đánh giá hiệu quả phanh tái sinh đối với các động cơ điện khác nhau hay sách [3] nêu ra phương pháp để điều khiển tần số trong quá trình phanh tái sinh,... nhưng các tài liệu và nghiên cứu trên chưa kết hợp được lực phanh tái sinh với lực phanh yêu cầu của hệ thống phanh để đưa ra phương án điều khiển phanh, nhằm đảm bảo được an toàn cũng như tận dụng được tối đa lực phanh tái sinh tại các vận tốc và cường độ phanh khác nhau.

Vậy nên, trên cơ sở về lý thuyết thiết kế hệ thống phanh và phân chia lực phanh để xây dựng nên chiến lược thiết kế và phân bố lực phanh tái sinh và ma sát nhằm đảm bảo an toàn và tận dụng lực phanh tái sinh này.

Trong bài báo này nêu ra được cách thức và phương pháp xây dựng đường phân bố lực phanh cùng với chiến lược phân bố lực phanh tái sinh và phanh ma sát, sau đó khảo sát để đánh giá được hiệu quả của chiến lược cũng như hiệu quả của hệ thống phanh tái sinh.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

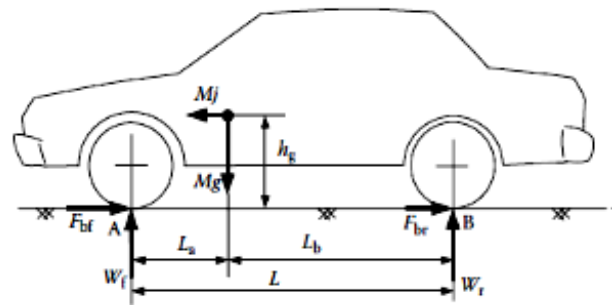
Để xác định được hiệu quả phanh tái sinh so với lực phanh yêu cầu, đầu tiên cần xác định được lực phanh yêu cầu tại các cường độ

phanh và vận tốc phanh khác nhau.

Dựa vào sách Lý thuyết ô tô [4], khi phanh xuất hiện gia tốc phanh j làm cho tọa độ trọng tâm bị thay đổi. Khi đó, lực phanh yêu cầu trên cầu trước phải lớn hơn cầu sau do tải trọng cầu trước lớn hơn để các bánh xe khóa cùng một lúc. Các lực tác dụng khi phanh được thể hiện ở hình 1. Trong đó: F_{bf} , W_f là lực phanh và tải trọng trên cầu trước; F_{br} , W_r là lực phanh và tải trọng trên cầu sau.

Theo phương thẳng đứng, ta có phương trình:

$$W_f + W_r = M.g \quad (1)$$



Hình 1. Lực tác dụng lên xe khi phanh

Theo phương dọc, ta có phương trình:

$$F_b = F_{bf} + F_{br} = M.j \quad (2)$$

Ta có phương trình cân bằng mô men tại điểm B:

$$M.j.h_g + M.g.L_b - W_f.L = 0 \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow W_f = \frac{M.g.L_b}{L} \left(1 + \frac{a.h_g}{g.L_b}\right) \quad (4)$$

Suy ra:

$$W_r = M.g - W_f = \frac{M.g.L_a}{L} \left(1 - \frac{j.h_g}{g.L_a}\right) \quad (5)$$

Lại có, lực phanh trên từng trục bằng

tích hệ số bám và tải trọng trên trục đó:

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{L_b}{L_a} \cdot \frac{1 + \frac{j \cdot h_g}{g \cdot L_b}}{1 - \frac{j \cdot h_g}{g \cdot L_a}} \quad (6)$$

Từ đó xác định được đường lực phanh lý tưởng với phân bố trên các cầu theo tải trọng

$$\frac{F_{bf}}{Mg} \text{ và } \frac{F_{br}}{Mg}$$

Khi đã xây dựng được đường lực phanh lý tưởng, cần xây dựng chiến lược để kết hợp phanh tái sinh và phanh ma sát. Với mong muốn lực phanh trên các cầu bám sát với đường lực phanh lý tưởng và tận dụng tối đa lực phanh tái sinh mà mô tơ điện có thể sinh ra thì cần xác định được lực phanh tái sinh cực đại mà mô tơ điện có thể đáp ứng được.

Mô men phanh tái sinh được xác định:

$$M_{ts_max} = \begin{cases} \frac{P_{max} \cdot 60}{2\pi \cdot 1500}, n \leq 1500 \text{ vòng/phút} \\ \frac{P_{max} \cdot 60}{2\pi \cdot n}, n > 1500 \text{ vòng/phút} \end{cases} \quad (7)$$

Lực phanh tái sinh được tính bằng:

$$F_{ts} = \frac{M_{ts_max} \cdot i \cdot \eta}{r_{bx}} \quad (8)$$

Trong đó: M_{ts_max} là mô men phanh tái sinh lớn nhất mà mô tơ tạo ra;

P_{max} là công suất cực đại của mô tơ;

n là số vòng quay động cơ;

F_{ts} là lực tái sinh;

i là tỷ số truyền giảm tốc;

η là hiệu suất truyền động, lấy $\eta=0,9$;

r_{bx} là bán kính bánh xe.

Nhận thấy, mô men phanh tái sinh phụ thuộc vào vận tốc nên tại các giá trị vận tốc khác nhau thì lực phanh tái sinh cực đại là khác nhau.

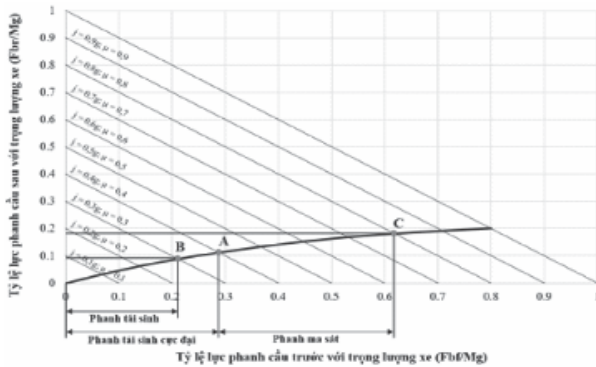
Với mong muốn tận dụng tối đa lực phanh tái sinh và đảm bảo lực phanh trên các cầu bám sát đường lực phanh lý tưởng, ta có được chiến lược điều khiển hệ thống phanh tái sinh - ma sát với việc ưu tiên tối đa sử dụng phanh tái sinh và khi lực phanh yêu cầu quá lớn thì kết hợp với phanh ma sát.

Để khảo sát hiệu quả của chiến lược và khả năng thu hồi năng lượng thì trong bài báo này sẽ khảo sát trên xe Nissan Leaf 2015 với các thông số cơ bản như bảng 1:

Bảng 1. Thông số kết cấu của xe Nissan Leaf

Đặc điểm	Thông số	Đơn vị
Chiều dài cơ sở	2700	mm
Khối lượng không tải (M)	1486	kg
Chiều dài L_a	900	mm
Chiều dài L_b	1800	mm
Chiều cao trọng tâm h_g	360	mm
Cầu dẫn động	Cầu trước	
Công suất (P)	80	kW
Bán kính bánh xe (r_{bx})	316	mm
Tỷ số truyền bánh răng giảm tốc (i)	8,193	

Với các thông số cơ bản ở bảng 1, ta có được đường phân bố lực phanh lý tưởng tại vận tốc 60 km/h như hình 2:



Hình 2. Chiến lược điều khiển phanh tái sinh và ma sát trên xe tham khảo

Với lực phanh tái sinh tối đa mà mô tơ điện có thể sinh ra tại vận tốc 60 km/h và cường độ phanh là 0,4g ở điểm A thì với cường độ phanh ở điểm B nhỏ hơn giá trị này lực phanh cầu trước được sử dụng hoàn toàn là phanh tái sinh. Tuy nhiên, ở điểm C khi cường độ phanh lớn hơn 0,4g thì lực phanh yêu cầu quá lớn so với khả năng tạo ra lực phanh của hệ thống phanh tái sinh. Lúc này, hệ thống phanh ma sát sẽ được kích hoạt và kết hợp cùng hệ thống phanh tái sinh.

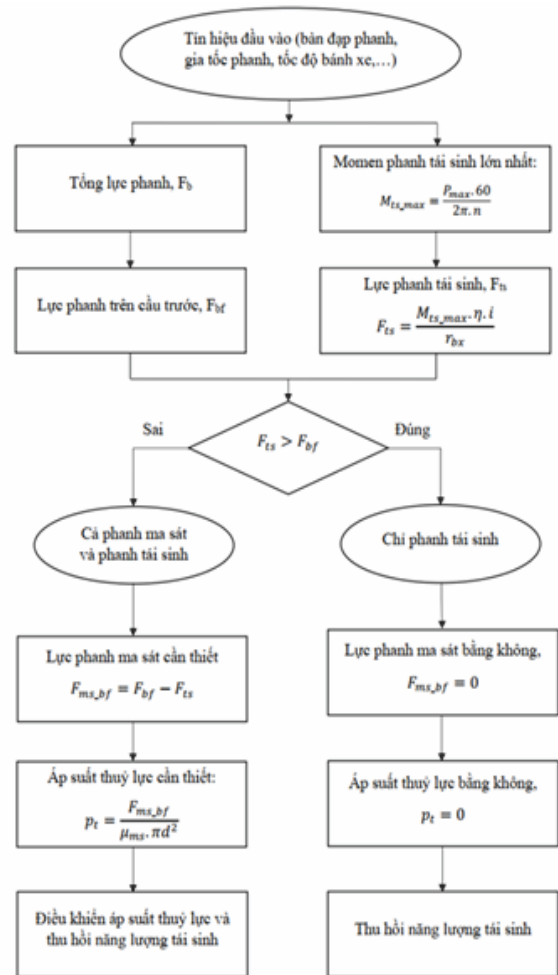
Chiến lược thiết kế và đường lực phanh lý tưởng được xác định từ đó xây dựng được thuật toán điều khiển:

3. PHƯƠNG ÁN KHẢO SÁT VÀ KẾT QUẢ

Do mô men phanh tái sinh phụ thuộc vào vận tốc trong khi lực phanh yêu cầu lại phụ thuộc vào cường độ phanh nên kết quả được khảo sát trên các dải tốc độ và vận tốc khác nhau. Kịch bản khảo sát được lựa chọn tại các vận tốc thấp đến cao ở 20 km/h và 60 km/h cùng với cường độ phanh giới hạn ở 0,6g phù hợp với quá trình phanh trong thực tế.

Bảng 2. Kịch bản khảo sát và kết quả

Vận tốc (km/h)	Cường độ phanh					
	0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g	0.6g
20	1200%	589%	385%	283%	223%	182%
60	436%	214%	140%	103%	81%	66%



Hình 3. Thuật toán điều khiển được xây dựng

Việc khảo sát sẽ đánh giá được hiệu quả của hệ thống phanh tái sinh trong dải vận tốc và cường độ phanh, với giá trị tỷ lệ lực phanh tái sinh với lực phanh yêu cầu được thể hiện ở bảng 2 thì khả năng hấp thụ của hệ thống phanh tái sinh là rất lớn, đáp ứng được gần như hoàn toàn yêu cầu của hệ thống phanh. Tuy nhiên chỉ khi cường độ phanh quá lớn thì cần phải sử dụng thêm lực phanh ma sát bổ sung như tại vận tốc 60 km/h với cường độ phanh 0,6g chỉ đáp ứng được 66% lực phanh yêu cầu. Lúc này, lực phanh ma sát chỉ cần bổ sung thêm 34% tổng lực phanh.

Khảo sát tại vận tốc xe 20 km/h

Xác định tổng lực phanh và lực phanh trên các cầu theo cường độ phanh:

Theo công thức PT (2), ta xác định được tổng lực phanh theo cường độ phanh j:

$$F_b = F_{bf} + F_{br} = M \cdot j$$

Từ phương trình (6) xác định được tỷ số F_{bf}/F_{br} :

$$\frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{W_f}{W_r} = \frac{L_b}{L_a} \cdot \frac{1 + \frac{j \cdot h_g}{g \cdot L_b}}{1 - \frac{j \cdot h_g}{g \cdot L_a}}$$

Từ phương trình (2) và (6) xác định được F_{bf} và F_{br} theo cường độ phanh.

Xác định lực phanh tái sinh tại vận tốc 20 km/h

Từ vận tốc xe, ta xác định được vận tốc

góc của xe:

$$\omega_{bx} = \frac{v}{r_{bx}} = \frac{20}{3,6 \cdot 0,316} = 17,58 \text{ (rad/s)}$$

Từ vận tốc góc, qua tỷ số truyền của hộp số xác định được vận tốc góc động cơ:

$$\omega_{dc} = 8,193 \cdot 17,58 = 144,04 \text{ (rad/s)}$$

Từ vận tốc góc động cơ, ta có số vòng quay động cơ:

$$n_{dc} = \frac{60 \cdot \omega_{dc}}{2\pi} = \frac{60 \cdot 144,04}{2\pi} = 1375,52 \left(\frac{\text{vòng}}{\text{phút}} \right)$$

Vì số vòng quay nhỏ hơn 1500 vòng/phút, theo phương trình PT (2.7) xác định được mô men phanh tái sinh cực đại:

$$M_{ts_max} = \frac{P_{max} \cdot 60}{2\pi \cdot 1500} = \frac{80000 \cdot 60}{2\pi \cdot 1500} = 509,31 \text{ (N.m)}$$

Từ phương trình PT (2.8) xác định được lực phanh tái sinh cực đại:

$$F_{ts} = \frac{M_{ts_max} \cdot i \cdot \eta}{r_{bx}} = \frac{509,31 \cdot 8,193 \cdot 0,9}{0,316} = 11884,5 \text{ (N)}$$

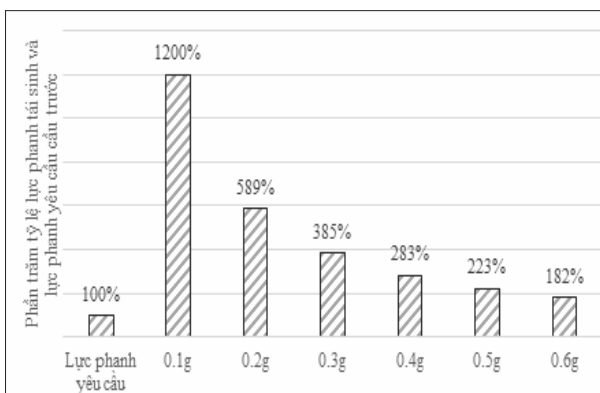
Khi lực phanh tái sinh nhỏ hơn lực phanh yêu cầu, thì lực phanh ma sát cần được bổ sung vào nhằm đảm bảo lực phanh yêu cầu. Lực phanh ma sát bổ sung được xác định bằng $F_{bf_ms} = F_{bf} - F_{ts}$.

Theo cường độ phanh từ 0,1g đến 0,6g và vận tốc 20 km/h, ta có được bảng 3:

Bảng 3. Thông số về lực phanh tại các cường độ phanh ở vận tốc 20 km/h

Cường độ phanh Thông số	0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g	0.6g
Tổng lực phanh F_b (N)	1456.28	2912.56	4368.84	5825.12	7281.40	8737.68
Lực phanh tái sinh F_{ts} (N)	11884.5	11884.5	11884.5	11884.5	11884.5	11884.5
Lực phanh cầu trước F_{bf} (N)	990.27	2019.37	3087.31	4194.09	5339.69	6524.13
Phần trăm tỷ lệ F_{ts}/F_{bf} (%)	1200%	589%	385%	283%	223%	182%
Lực phanh ma sát cầu trước F_{ms_bf} (N)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Từ lực phanh yêu cầu cầu trước với lực phanh tái sinh cầu trước, ta có phần trăm lực phanh tái sinh so với lực phanh yêu cầu (F_{ts}/F_{bf}):



Biểu đồ 1. Phần trăm lực phanh tái sinh so với lực phanh yêu cầu tại vận tốc 20 km/h

Nhìn vào biểu đồ, ta thấy với cường độ

phanh từ 0,1g đến 0,6g thì lực phanh tái sinh có thể tạo ra vượt lực phanh yêu cầu. Với cường độ phanh nhỏ thì lực phanh tái sinh rất lớn và với cường độ phanh là 0,1g thì lực phanh tái sinh gấp 12 lần lực phanh yêu cầu tại 20 km/h. Do ở vận tốc thấp, mô men phanh tái sinh mà động cơ điện tạo ra lớn nên phanh tái sinh đáp ứng được yêu cầu của hệ thống phanh.

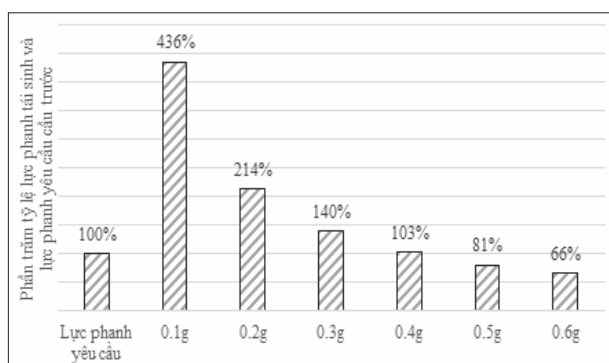
Khảo sát tại vận tốc xe 60 km/h

Khi tốc độ lên tới 60 km/h thì lực phanh tái sinh giảm đáng kể cho nên tỷ lệ lực phanh tái sinh so với lực phanh yêu cầu ở cầu trước thay đổi. Tương tự như khi khảo sát tại vận tốc 20 km/h, ta có được bảng 4:



Bảng 4. Thông số về lực phanh tại các cường độ phanh ở vận tốc 60 km/h

Cường độ phanh Thông số	0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g	0.6g
Tổng lực phanh F_b (N)	1456.28	2912.56	4368.84	5825.12	7281.40	8737.68
Lực phanh tái sinh F_{ts} (N)	4320.00	4320.00	4320.00	4320.00	4320.00	4320.00
Lực phanh cầu trước F_{bf} (N)	990.27	2019.37	3087.31	4194.09	5339.69	6524.13
Phần trăm tỷ lệ F_{ts}/F_{bf} (%)	436%	214%	140%	103%	81%	66%
Lực phanh ma sát cầu trước $F_{ms_{bf}}$ (N)	0.00	0.00	0.00	0.00	1019.69	2204.13



Biểu đồ 2. Phần trăm lực phanh tái sinh so với lực phanh yêu cầu tại vận tốc 60 km/h

Với cường độ phanh nhỏ tại 0,1g, lực phanh tái sinh vẫn đảm bảo được tới 436% so với lực phanh yêu cầu. Tuy nhiên, khi cường độ phanh tăng lên tới 0,6g thì lực phanh tái sinh không thể đáp ứng được yêu cầu của hệ thống phanh khi chỉ đáp ứng được 66%, lúc này hệ thống phanh ma sát bổ sung thêm 34% lực phanh yêu cầu.

Từ các vận tốc và cường độ phanh khác nhau, ta thu được khả năng đáp ứng của phanh tái sinh theo tỷ lệ F_{ts}/F_{bf} như sau:

Bảng 5. Hiệu quả phanh tái sinh tại các vận tốc và cường độ phanh khác nhau

Cường độ phanh Vận tốc (km/h)	0.1g	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g	0.6g
10	12.00	5.89	3.85	2.83	2.23	1.82
20	12.00	5.89	3.85	2.83	2.23	1.82
30	8.72	4.28	2.80	2.06	1.62	1.32
40	6.54	3.21	2.10	1.55	1.21	0.99
50	5.23	2.57	1.68	1.24	0.97	0.79
60	4.36	2.14	1.40	1.03	0.81	0.66
70	3.74	1.83	1.20	0.88	0.69	0.57
80	3.27	1.60	1.05	0.77	0.61	0.50
90	2.91	1.43	0.93	0.69	0.54	0.44
100	2.62	1.28	0.84	0.62	0.49	0.40

Khi đó, phanh tái sinh đáp ứng rất tốt ở dải tốc độ thấp dưới 30 km/h và giảm dần khi vận tốc tăng và cường độ phanh tăng. Với cường độ phanh dưới 0,3g thì có thể thấy lực phanh tái sinh đáp ứng được với dải vận tốc lên tới 80 km/h. Qua bảng trên cũng thấy được rằng, việc tận dụng phanh tái sinh cùng với phanh ma sát giúp giảm tải cho hệ thống phanh ma sát rất nhiều, khi mà tại vận tốc rất cao ở 100 km/h và cường độ phanh lớn ở 0,6g thì phanh tái sinh vẫn đáp ứng được 40% yêu cầu của hệ thống phanh.

4. KẾT LUẬN

Ở các vận tốc và cường độ phanh khác nhau thì lực phanh tái sinh đáp ứng được khác nhau. Và để đảm bảo được yêu cầu của hệ thống phanh thì vẫn phải sử dụng phanh ma sát ở các dải tốc độ cao do lực phanh tái sinh tỷ lệ nghịch với vận tốc. Việc khảo sát trên xe điện công suất nhỏ như Nissan Leaf cho thấy rằng, tại cường độ phanh thấp thì lực phanh tái sinh có thể đáp ứng được hoàn toàn yêu cầu của hệ thống phanh ngay cả tại vận tốc 60 km/h và cường độ phanh 0,3g thì lực phanh tái sinh vẫn có thể đáp ứng lên tới 140% lực phanh yêu cầu. Tuy nhiên, khi cường độ phanh lớn làm cho lực phanh yêu cầu quá lớn, cùng với đó nếu vận tốc lớn làm giảm lực phanh tái sinh dẫn tới lực phanh tái sinh không đáp ứng được yêu cầu của hệ thống phanh. Ví dụ, với vận tốc 60 km/h và cường độ phanh là 0,6g thì phanh tái sinh chỉ có thể đáp ứng được 66% lực phanh yêu cầu, dẫn tới phanh ma sát phải được kích hoạt cùng phanh tái sinh để đảm bảo lực phanh yêu cầu.

Việc lựa chọn chiến lược kết hợp lực phanh ma sát và phanh tái sinh bám sát đường lực phanh lý tưởng, cùng với tận dụng tối đa được lực phanh tái sinh mà mô tơ điện có thể cung cấp tại vận tốc xác định, làm cho hệ thống phanh vừa đảm bảo an toàn cũng như thu hồi được lực phanh tái sinh lớn nhất có thể tại các cường độ phanh khác nhau.

Qua việc khảo sát còn nhận thấy rằng, bánh răng giảm tốc góp phần lớn để tăng lực phanh tái sinh. Với công suất mô tơ điện nhỏ thì việc sử dụng bánh răng giảm tốc là rất hiệu quả. Tuy nhiên, ngày nay thì phương án được ứng dụng là tăng công suất của mô tơ, với công suất mô tơ cao cho phép tạo được mô men phanh tái sinh lớn đồng thời có thể loại bỏ hộp số giảm tốc giúp giảm trọng lượng và không gian xe. ❖

Ngày nhận bài: **01/8/2022**

Ngày phản biện: **07/8/2022**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Mohammad Masoud Namazi, Seyed Morteza Saghaiannejad, Amir Rashidi and Jin-Woo Ahn; “*Maximum Power Recovery of Regenerative Braking in Electric Vehicles Based on Switched Reluctance Drive*”, J Electr Eng Technol, 2018.
- [2]. Jarrad Cody, Özdemir Göl, Zorica Nedic, Andrew Nafalski, Aaron Mohtar; “*Regenerative braking in an electric vehicle*”, https://www.researchgate.net/publication/229008205_Regenerative_braking_in_an_electric_vehicle, 2009.
- [3]. Iqbal Husain; *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*, CRC Press, 2003.
- [4]. Lưu Văn Tuấn; *Lý thuyết ô tô*, NXB. Giáo dục Việt Nam, 2019.

