709 乗り心地を考慮した電気自動車の省エネルギー加速法の検討

Examination of saving energy acceleration method of an electric vehicle that considering comfortable ride

○ 学 辻 議正 (島根大学) 正 泉 照之 (島根大学) 正 周 海 (島根大学)

Norimasa Tsuji, Shimane University, 1060, Nishi-Kawatsu-cho, Matsue, Shimane

Teruyuki IZUMI, Shimane University

Hai ZHOU, Shimane University

Key Words: Saving energy, Comfortable ride, Electric vehicle, Optimal velocity function

1 はじめに

地球温暖化が深刻化する中で、世界的に電気自動車 (EV) の普及が進められている。EV は、排出する二酸化炭素がゼロであるため、温暖化対策には欠かせない存在である。日本においても EV への意識が高まっており、様々な研究が増え、開発が年々進んでいる。EV の電池のエネルギーは、減速時に充電されるが、加速時には放電する。つまり、一度の充電で長距離運転するためには、放電エネルギーを低減させることが重要となる。放電エネルギーは、運動エネルギーと散逸エネルギーの和であるが、運動エネルギーは減速時に回生される。したがって、散逸エネルギーを低減させる加速パターンを研究することは、非常に重要となる。

本稿では、加速時間を一定とし、散逸エネルギーを最小にする最適加速距離を求め、その条件下で省エネルギーな加速パターンを決める。しかし、単に散逸エネルギーを小さくする加速パターンでは、乗り心地が悪くなる。したがって、乗り心地も考慮に入れて、どのような加速パターンが省エネルギーでかつ乗り心地を良くするかを検討する。

2 モデル化と運動方程式

Fig.1 は、電気自動車の駆動部をモデル化した図である。\$K\$ はトルク定数 [Nm/A], \$H_m\$ はモータの慣性モーメント [kgm/s\$^2\$], \$i(t)\$ はモータの駆動電流 [A], \$\eta\$ は歯車の動力伝達効率である。車輪を駆動するトルク \$\tau_{out}\$ は、モータからの出力トルク \$\tau_{in} = Ki(t) - H_m\ddot{\theta}_m(t)\$ と、歯車間で生じる摩擦トルク \$F_g\$、減速比 \$n\$ を用いて、\$\tau_{out} = n(\tau_{in} - F_g)\$ と表される。したがって、車輪側に換算した車輪の駆動トルクは、次のようになる。

$$\tau_{out} = n\eta(Ki(t) - nH_m\ddot{\theta}(t)) \quad (1)$$

Fig.2 は、車輪と車体をモデル化した図である。回転角度 \$\theta(t)\$ の車輪の運動方程式は、式 (1) を用いて次のようになる。

$$H\ddot{\theta}(t) + rF_d + F_r' = n\eta Ki(t) \quad (2)$$

ここで、\$H = H_t + n^2\eta H_m\$ は駆動系の等価慣性モーメントを示す。一方、車体の運動方程式は、

$$M_a\ddot{x}(t) = F_d - b\dot{x}(t) - G_r \quad (3)$$

となる。ここで、粘性摩擦力を簡単化するため、速度を平均化した \$\overline{b\dot{x}(t)}\$ とした。また、\$G_r = Mgsin\phi\$、\$b\$ は粘性摩擦係数、\$g\$ は重力加速度である。直進運動における車両の運動方程式は、式 (2)、(3) と \$\theta = \frac{x}{r}\$ の関係から次のようになる。

$$M\ddot{x}(t) + F_r + G_r = \frac{n\eta Ki(t)}{r} \quad (4)$$

ここで、\$M = \frac{H}{r^2} + M_a\$ は系の等価慣性質量、\$F_r = \overline{b\dot{x}(t)} + \frac{F_r'}{r}\$ は系に与える等価摩擦力を示す。

3 評価関数

本稿では省エネルギーを目的とするが、電気自動車においても乗り心地も非常に重要な評価要素となってくる。乗り心地は、

Fig. 1 Model of driving parts

Fig. 2 Model and Paramotor

加速度の時間変化とし、Jerk を用いて評価される⁽¹⁾。本研究での評価関数 \$J\$ は、モータで発生するジュール熱損失と系の摩擦熱損失および Jerk の加重加算和で、次のように表す。

$$J = \alpha \int_0^{t_f} \{ R i(t)^2 + F_r \dot{x}(t) \} dt + (1 - \alpha) \int_0^{t_f} \left(\frac{d\ddot{x}(t)}{dt} \right)^2 dt \quad (5)$$

ここで、\$t_f\$ は加速時間、\$R\$ はモータの電気抵抗、\$\alpha\$ は省エネルギーと乗り心地の割合を示すものである。\$\alpha = 0\$ の場合は乗り心地性を、\$\alpha = 1\$ の場合は省エネルギー性を重視することを意味している。

4 最適制御理論⁽²⁾と境界条件

式 (5) は速度と電流の関数で表されている。乗り心地を考慮した上での省エネルギー運転は、これら 2 つの関数を最適にしなければならない。そこで最適制御理論を用いて最適速度・電流関数を求める。自動車の加速時間 \$t_f\$ は、ドライバーの性格や道路状況によって違ってくるため本稿では指定する。目標速度 \$v_f\$ も法定速度が定まっているので指定する。加速距離 \$x_f\$ は、\$t_f\$ と \$v_f\$ に依存し、散逸エネルギーを最小にする最適加速距離である。本稿では、駆動における境界条件を次のようにする。

・初期・最終値の条件

$$\begin{cases} x(0) = 0, x(t_f) = x_f \\ \dot{x}(0) = 0, \dot{x}(t_f) = v_f \end{cases} \quad (6)$$

また、加速度の条件は初期・最終時刻での乗り心地を考慮して次のように指定する。

・加速度の条件

$$a(0) = a(t_f) = 0 \quad (7)$$

式 (6)、(7) の 6 個の条件から、最適速度関数が一意に求められる。最適電流関数は、求まる速度関数を式 (4) に代入して求められる。なお、電流関数と加速度関数は式 (4) のような線形関係にある。

Tab. 1 Parameters used in simulations

K	1 [N·m]	r	0.3 [m]
R	0.2 [Ω]	M	1000 [kg]
η	0.9	F_r	0.3 [N]
n	0.6	v_f	10 [m/s]
$\sin \phi$	0.2	t_f	10 [s]

5 最適関数・最適加速距離

一般の α を含む式 (5) の最適速度 ($\dot{x}_{er}$)・電流関数および加速度関数は、指数関数を含む多項のため本稿では割愛する。

5.1 省エネルギー重視の最適関数・加速距離

$\alpha=1$ のときの最適速度関数は次のような 2 次関数になる。

$$\dot{x}_e(t) = \frac{(3t_f v_f - 6x_f)t^2 - t_f(2t_f v_f - 6x_f)t}{t_f^3} \quad (8)$$

電流と加速度関数は、式 (4) より 1 次関数となる。これらの最適関数を式 (5) に代入し、式 (5) を最小にする最適加速距離は $\frac{\partial J(x_f)}{\partial x_f} = 0$ により次のようになる。

$$x_f = \frac{t_f v_f}{2} - \frac{F_r(Kn\eta t_f)^2 t_f}{24(Mr)^2 R} \quad (9)$$

式 (9) は、摩擦力が小さい場合、第二項目はほぼ 0 となるので、式 (9) は $x_f \approx \frac{t_f v_f}{2}$ となる。この条件は、最適速度関数式 (8) の 2 次の係数が 0、すなわち、1 次関数となる場合に相当する。

5.2 乗り心地重視の最適関数・加速距離

$\alpha=0$ のときの最適速度関数は次のような 4 次関数になる。

$$\dot{x}(t) = \frac{30(t - t_f)^2 t^2 x_f - t_f v_f(5t - 6t_f)(3t - 2t_f)t^2}{t_f^5} \quad (10)$$

電流および加速度関数は、式 (4) より 3 次関数となる。前節同様に、最適加速距離は $\frac{\partial J(x_f)}{\partial x_f} = 0$ により次のようになる。

$$x_f = \frac{t_f v_f}{2} - \frac{7F_r(Kn\eta t_f)^2 t_f}{240(Mr)^2 R} \quad (11)$$

式 (11) も前節同様に、 $x_f \approx \frac{t_f v_f}{2}$ となる。

6 速度関数が散逸エネルギーに及ぼす影響

Tab.1 は、今回用いるパラメータである。Fig.3 は、Tab.1 の基における 5.1, 5.2 節で求めた最適速度・加速度関数である。このときの最適加速距離は、およそ 50[m] である。破線が $\alpha=1$ 、実線が $\alpha=0$ の場合の結果である。破線は、初期・最終時刻で加速度が急激に変化し、乗り心地が悪いことを示す。乗り心地のみを評価した実線は、初期・最終時刻における乗り心地が改善されたことを示す。しかし、散逸エネルギーを比較した Fig.4 から、最適加速距離における●($\alpha=0$)と▲($\alpha=1$)を比較すると、前者における散逸エネルギーが増加した。この増分エネルギーを低減し、かつ、乗り心地が良い α を散逸エネルギーと比較しながら検討し、実用的な加速パターンを決める。

7 実用的な α の検討と加速パターン

Fig.5 は、 α と散逸エネルギーの関係を示した図である。Fig.5 から、 α が 0.1 以上で散逸エネルギーの変化がほぼないとわかる。つまり、 α は 0.1 以下の乗り心地重視で決めることができる。シミュレーションにより、先ほどの増分エネルギーを半分近く低減でき、乗り心地の良い α として、 $\alpha=0.001$ と決めた。5 節で述べた一般の α における最適速度関数は、Tab.1 のパラメータと $\alpha=0.001$ を用いることにより、次のように簡単に表すことができる。

$$\dot{x}_{er} = 1.341t - 0.001e^{0.79t} + 1.705e^{-0.79t} - 1.705 \quad (12)$$

Fig. 3 Optimal velocity and acceleration function with optimal x_f for saving energy($\alpha=1$) and comfortable ride($\alpha=0$)

Fig. 4 Dissipated Energy for optimal x_f

Fig. 5 Dissipated Energy for α

Fig. 6 Optimal velocity and acceleration function with optimal x_f for $\alpha=0.001$

式 (12) は、指数関数の項によって初期・最終時刻での乗り心地を改善していることを意味する。この速度・加速度関数を Fig.6 に示す。Fig.6 のような速度・加速度関数が、乗り心地が良く省エネルギーな実用的な速度・加速度パターンとなる。

8 まとめ

電気自動車の車輪・車体をモデル化し、車両の運動方程式を導いた。評価関数は、散逸エネルギーと乗り心地を考慮したものとし、最適制御理論により最適関数を求めた。最適加速距離の基で省エネルギーのみ、乗り心地のみの速度・加速度関数を示した。省エネルギーのみでは乗り心地が悪く、それを改善したが、散逸エネルギーが増加した。この増分エネルギーを低減し、乗り心地のよい α を検討し、 $\alpha=0.001$ 程度のときに実用的な速度・加速度パターンであるとわかった。

【参考文献】

- (1) 戴 建華, 坂井真一郎, 堀 洋一: 速度パターン整形を導入した電気自動車の新しい運転制御法の提案, 電気学会産業応用部門大会, No. 245, (2002)
- (2) 加藤寛一郎: 工学的最適制御, 東京大学出版会 (1988)