

## 다중-전동기 구동형 전기자동차 추진제어 알고리즘 개발에 관한 연구

박정우\* , 하회두, 구대현, 김종우, 이재봉, 김홍근\*  
한국전기연구소, 경북대학교\*

### Development of Traction Control Algorithm for Multi-Motor Driven Electric Vehicle

Jungwoo Park\* , Hoidoo Ha, Daehyun Koo, Jongmoo Kim, Jaebong Lee, Heunggeun Kim\*  
Korea Electrotechnology Research Institute, Kyungpook National University\*

#### Abstract

In order to enhance the driveability of multi-wheel-drive electric vehicle fitted with a traction control system, a traction control algorithm is proposed. Numerical computations show that the driveability could be considerably enhanced with respect to that of equivalent torque distribution vehicle.

#### 1. 서 론

전기자동차에 대한 연구는 내연기관을 탑재한 차량에서 발생하는 배출가스가 환경 오염의 주요 원인으로 제기되면서 범세계적으로 진행되고 있으며, 21세기초에 실용화를 목표로 많은 시작품이 발표되고 있으며 이미 완성 차를 발표하여 시장을 선점하고 있는 추세이다.

국내에서도 차세대자동차기술의 일환으로 전기자동차에 대한 연구가 진행되고 있으며, 한국전기연구소에서 전동기 2대로 추진되는 전기자동차 시작품을 제작하여 발표한 바 있다[1].

전동기 2대로 구동되는 전기자동차는 전동기 한 대로 구동되는 시스템과 비교할 때 전동기 좌우 구동바퀴에 전용의 전동기가 각각 동력을 전달할 수 있기 때문에, 독립제어가 가능하며 전동기 한 대로 순속되는 전기자동차와는 달리 차동기어가 필요하지 않은 장점이 있다. 또한 대상 차의 제원이 결정된 후 요구되는 속도대 토크 사양을 2대의 전동기로 분담하기 때문에 소형화가 가능하고, 이로써 지상고를 낮출 수 있으며 궁극적으로는 전동기가 바퀴와 나란히 붙는 바퀴 일체형 전기자동차 개발을 가능케 할 수 있는 장점이 있다.

그런데 이러한 장점을 부각시키기 위해서는 전동기 2대를 한 개의 디지털 제어보드에서 구동이 가능토록 하여 탑재 공간이 커지지 않도록 해야하며, 선회와 차선 변경시에도 안정한 주행을 할 수 있도록 좌우 구동륜에 기준 토크를 적절히 지령해 줄 수 있는 추진제어알고리즘을 구비한 시스템제어기가

필요하다.

따라서 본 논문에서는 다중전동기에 의해서 구동되는 전기자동차의 추진제어기 기능과 성능 검증을 하기 위하여 전기자동차 모델링, 추진 제어알고리즘, 그리고 동특성 분석 순서로 살펴보고자 한다.

#### 2. 전기자동차 모델링

전동기 2대로 구동되는 전기자동차와 시스템제어기의 구성도를 그림[1]에 나타내었다. 이에대한 동특성을 분석하기 위하여 다음과 같이 모델링을 수행하였다[2][3].

$$M\ddot{x} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + F_c \sin \beta \quad (2.1)$$

$$M\ddot{y} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 - F_c \cos \beta \quad (2.2)$$

$$I\ddot{\psi} = I_f(Y_1 + Y_2) - I_f(Y_3 + Y_4) - d(X_1 + X_3) + d(X_2 + X_4) \quad (2.3)$$

$$I_{\omega} \frac{\dot{V}_{wi}}{r^2} = \frac{T_i}{r} - F_{xi} \quad (i = 1 \sim 4) \quad (2.4)$$

여기서

$$X_i = F_{xi} \cos \delta_i - F_{yi} \sin \delta_i \quad (i = 1 \sim 4) \quad (2.5)$$

$$Y_i = F_{xi} \sin \delta_i + F_{yi} \cos \delta_i \quad (i = 1 \sim 4) \quad (2.6)$$

$$F_c = M \frac{V^2}{\rho} = MV(\dot{\psi} + \dot{\beta}) \quad (2.7)$$

$$F_{yi} = -\mu_{yi} m_i g \quad (i = 1 \sim 4)$$

$$F_{xi} = \mu_{xi} m_i g \quad (i = 1 \sim 4) \quad (2.8)$$

$$m_1 = \frac{l_r}{2(l_f + l_r)} \left( M - \frac{hF_c}{dg} \right) \quad (2.10)$$

$$m_3 = \frac{l_f}{2(l_f + l_r)} \left( M - \frac{hF_c}{dg} \right) \quad (2.11)$$

$$m_2 = \frac{l_r}{2(l_f + l_r)} \left( M + \frac{hF_c}{dg} \right) \quad (2.12)$$

$$m_4 = \frac{l_f}{2(l_f + l_r)} \left( M + \frac{hF_c}{dg} \right) \quad (2.13)$$

$$\lambda_i = \begin{cases} \frac{v_{wi} - v_i}{v_{wi}} & (v_{wi} \geq v_i) \\ \frac{v_{wi} - v_i}{v_j} & (v_{wi} < v_i) \end{cases} \quad (2.14)$$

### 3. 추진제어알고리즘

#### 3.1 주행저항력

자동차의 성능을 시뮬레이션 하기 위해서는 주행 저항력(Drag)을 알아야하며, 전주행저항력 (R)을 구름저항력 (R<sub>r</sub>), 공기저항력 (R<sub>f</sub>), 가속저항력 (R<sub>a</sub>) 그리고, 구배저항력 (R<sub>s</sub>)으로 나눌때 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$R_r = \mu_r M g$$

$$R_f = \frac{\rho C_f}{2} A V^2$$

$$R_a = a(1 + \psi) M$$

$$R_s = M g \sin \theta$$

$$R = R_r + R_f + R_a + R_s$$

속도와 주행경사에 따른 주행저항력을 등속 조건에서 표[1]의 제원에따라 계산하면 그림[2]와 같다.

#### 3.2 좌우 구동륜 토크 분배 알고리즘

추진제어 알고리즘의 기본 구성은 가속페달로부터 들어오는 토크 기준치와 핸들로부터 들어오는 핸들각을 가지고 노면 조건과 요각속도(Yawrate)에 따라서, 좌우 구동륜에 인가하는 토크값을 적절히 분배함으로써 선회시에는 좌우구동륜에 토크값을 다르게 구동함으로써 결과적으로 요잉모멘트(Yawing Moment)를 발생시켜 안정한 동특성을 얻도록 하고있다. 따라서 좌우 구동륜에 걸리는 토크량을 적절히 분배 하는 것이 추진제어 알고리즘의 핵심이기 때문에 이에대하여 살펴보고자 한다.

시스템에 요잉모멘트 (M<sub>z</sub>)가 고려된 상태 방정식을 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\dot{X} = AX + b_1 \delta + b_M M_z \quad (3.1)$$

여기서

$$M_z = h_\beta \beta + h_r \psi + h_f \phi + h_p P + h_d \delta \quad (3.2)$$

$$= h_x^T X' + h_d \delta$$

$$h_x^T = [h_\beta \ h_r \ h_f \ h_p]$$

$$X' = [\beta \ \psi \ \phi \ P]$$

이다. 그런데  $\beta, \phi, P$  의 영향은 크지않기때문에

$$M_z \approx h_r \psi + h_d \delta = h_r \left( \psi + \frac{h_d}{h_r} \delta \right) \quad (3.3)$$

으로 간략하게 쓸 수 있으며, 또한 타이어의 선형 영역 내에서  $\psi$ 는

$$\psi = -\frac{V}{L} \cdot \delta \quad (3.4)$$

으로 추정이 가능하므로 M<sub>z</sub> 는

$$M_z = h_r \left( \psi - \frac{V}{L} \delta \right) \quad (3.5)$$

으로 표현할수있다. 따라서 요각속도(Yaw Rate)이득인 h<sub>r</sub>을 조절하면 목표로 하는 요각속도( $\psi$ )

와 추정되는 요각속도 차이에 의해서 시스템에서 발생시킬 요잉모멘트량을 결정할 수 있으며, 이 M<sub>z</sub>가 발생하도록 좌우 구동륜에 슬립(Slip)차를 갖도록 결정할 수 있으며 이 값에 비례하여 구동륜이 보정해야 할 값을 결정하는 원리이다. 달리 표현하면 좌우 구동륜에 원계적조향(Neutral Steering)이 되도록 하는 M<sub>z</sub>를 발생시키기 위하여 좌우 구동륜의 슬립차이에 비례하여 좌우 구동륜에 인가해야 할 토크에 차이를 결정하는 원리이다.

수식으로 표현하면

$$M_z = h_r \left( \psi - \frac{V}{L} \delta \right) \quad (3.6)$$

에서 M<sub>z</sub>를 좌우 바퀴에 걸리는 슬립차의 기준치로 주기 위하여  $\Delta \lambda_x^*$ 으로 정하면

$$\Delta \lambda_x^* = k_1 \left( \psi - \frac{V}{L} \delta \right) \quad (3.7)$$

$$= \lambda_L^* - \lambda_R^* \quad (3.8)$$

으로써 좌우 구동 바퀴에서 가져야 하는 슬립 목표치를 결정할 수 있다. 실제 차량에서의 슬립차  $\Delta \lambda_x$  는 다음과 같으므로

$$\Delta \lambda_x = \lambda_L - \lambda_R \quad (3.9)$$

보정토크는 슬립 목표치와 실제슬립 값과의 차이에 비례하도록

$$T_c = k_2 (\Delta \lambda_x^* - \Delta \lambda_x) \quad (3.10)$$

으로 결정하면 된다. 그리고 바깥쪽에 걸리는 토크가 많이 걸리도록 부호를 정하면, 왼쪽으로 선회시 좌우 구동륜에 인가할 토크는 각각 다음으로 정할 수 있다.

$$T_L^* = \frac{T_c^*}{2} - T_c k_L \quad (3.11)$$

$$T_R^* = \frac{T_c^*}{2} + T_c k_R \quad (3.12)$$

여기서

$$k_L = \frac{1}{|\lambda_L| + 1}, \quad k_R = \frac{1}{|\lambda_R| + 1} \quad (3.13)$$

이다. k<sub>L</sub>과 k<sub>R</sub>은 슬립율이 크거나, 좌우 비대칭 노면 조건시 슬립율을 고려하여 토크 보정량을 조절해 주기 위한 것으로 정상상태에서는 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 위의 토크식으로부터 좌·우 구동륜에 걸리는 토크 차이는 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\Delta T^* = T_R^* - T_L^* = \left\{ k_1 k_2 \left( \psi - \frac{V}{L} \delta \right) - k_2 \Delta \lambda_x \right\} (k_L + k_R) \quad (3.14)$$

#### 3.3 슬립제어

슬립제어에서는 바퀴에서의 슬립율이 일정 영역 보다 높으면 분배된 토크를 약화시키는 역할을 수

행하여 시스템을 안정화 시키는 역할을 수행한다.

$$\tau_1 = k r_2$$

$\tau_1$  : 슬립제어기의 토크 지령

$\tau_2$  : 토크 분배 제어기의 토크 지령

$k$  : 약화계수

약화계수  $k$ 는 슬립비  $\lambda$ 에 따라 결정된다. 즉,

$$0 \leq |\lambda| < \lambda_0 \text{ 일 때 } k = 1$$

$$\lambda_0 \leq |\lambda| < \lambda_0' \text{ 일 때 } k = (|\lambda| - \lambda_0) / (\lambda_0 - \lambda_0')$$

$$\lambda_0' < |\lambda| \text{ 일 때 } k = 0$$

$\lambda_0$ 는 0.10~0.15,  $\lambda_0'$ 는 차속에 반비례하도록 설정한다. 단, 차속이 낮아지면 슬립비  $\lambda$ 의 연산오차가 커진다. 그래서 차속  $V_0$ 가 한계차속  $V_{oc}$  보다 낮을 때,  $\lambda$  대신에 슬립속도  $\Delta\lambda$ 를 사용하여  $k$ 를 정한다. 즉,

$$0 \leq |\Delta\lambda| < \Delta\lambda_c \text{ 일 때 } k = 1$$

$$\Delta\lambda_c \leq |\Delta\lambda| < \Delta\lambda_c' \text{ 일 때}$$

$$k = (|\Delta\lambda| - \Delta\lambda_c) / (\Delta\lambda_c - \Delta\lambda_c')$$

$$\Delta\lambda_c' \leq |\Delta\lambda| \text{ 일 때 } k = 0$$

$V_{oc}$ 는 10Km/h,  $\Delta\lambda_c$ 는 1.0~1.5Km/h,  $\Delta\lambda_c'$ 는  $\Delta\lambda_c$ 의 1.5~2.0배 정도의 값으로 선택한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

좌우 구동륜의 토크 분배 알고리즘을 분석해 보면 외란이 없는 직진시에는 좌우 구동륜에 동일하게 분배되고, 외란(횡풍)이 있는 직진시나 선회시에만 좌우 구동륜에 차동토크가 발생되도록 되어 있다. 따라서 향상된 동특성을 보일 수 있도록 좌우륜의 노면 마찰계수가 다른 조건에서 차선 변경시를 전제로 시뮬레이션을 수행하였다.  $t = 0$ 에서  $t = 18$ 까지 차를 시속 100Km/h까지 올린 후 등속 주행조건에서  $t = 20$ 이 되면 차폭이 4m인 차선을 변경하기 시작하면 운전자 모델에 의해서 조향각  $\delta_f$ 가 계산되어 주행에 들어간다. 좌우륜의 마찰계수를 다르게 주기 위하여  $t = 20 \sim 21$  ( $t = 21 \sim 22$ ) 사이에서는 안쪽(바깥쪽) 바퀴의 마찰계수를 정상 마찰계수의 80%로 낮추었다. 그림 3에서 제어를 수행하지 않았을 때, 즉 좌우륜에 균등토크를 분배할 경우와 추진제어 알고리즘을 적용하였을 때의 요각속도, 차의 미끄럼각, 구심가속도에 대하여 동특성을 보이고 있다. 각각의 비교에서 추진제어 알고리즘을 적용한 경우에서 빠른 요각속도와 구심가속도를 얻을 수 있음을 알 수 있기 때문에 조종성이 향상되었음을 알 수 있다.

#### 5. 결론

다중 전동기에 의해서 구동되는 전기자동차의 장

점을 살리면서 조종성과 안정성을 향상시킬 수 있는 추진제어 알고리즘에 대하여 살펴보았다.

추진제어 알고리즘의 핵심인 좌우 구동륜 분배 알고리즘을 제시하였으며, 이에 따른 동특성을 검증하기 위하여 모델링을 수행하였고, 차선변경과 좌우 구동륜에서의 마찰계수를 달리한 조건에서 향상된 요각속도와 구심가속도를 나타냄을 시뮬레이션을 수행하여 보였다. 따라서 요잉모멘트를 발생시켜 안정한 선회와 조종성을 향상시킬 수 있기 때문에 다중 전동기(2륜구동, 4륜구동) 구동형 전기자동차의 시스템 제어기로 적합하리라 판단되며 실험을 통한 검증 연구가 진행 중에 있다.

#### [참고 문헌]

- [1] 한국전기연구소, "Multi-Motor 시스템 제어 기술 개발" 과제보고서, 1996.
- [2] C. Doniselli, G. Mastinu, R. Cal. "Traction Control for Front-Wheel Drive Vehicles", Vehicle System Dynamics, PP.87-103, 1993.
- [3] Matsumoto, N., Tomizuka, M., "Vehicle Lateral Velocity and Yaw Rate Control With Two Independent Control Inputs", Traction of the ASME, Vol. 114, pp. 606-613, 1992.
- [4] Yamamoto M., "Active Control Strategy for Improved Handling and Stability", SAE paper 911902.

표 1 전기자동차 제원

|     |                  |                            |
|-----|------------------|----------------------------|
| 전동기 | 수 량              | 2개(전륜구동형)                  |
|     | 정격토크             | 47.7[Nm]                   |
|     | 최대속도             | 7500[RPM]                  |
| 차 량 | 휠베이스(L)          | 2.5[m]                     |
|     | 발판길이/2(d)        | 0.70[m]                    |
|     | 무게중심높이(h)        | 0.54[m]                    |
|     | 전방무게( $m_f$ )    | 963.21[kg]                 |
|     | 후방무게( $m_r$ )    | 692.78[kg]                 |
|     | 관성모멘트(I)         | 2212[kg·m <sup>2</sup> ]   |
|     | 바퀴관성모멘트( $I_w$ ) | 0.7539[kg·m <sup>2</sup> ] |

그림 1 좌우 구동륜 토크 분배 알고리즘 구성도

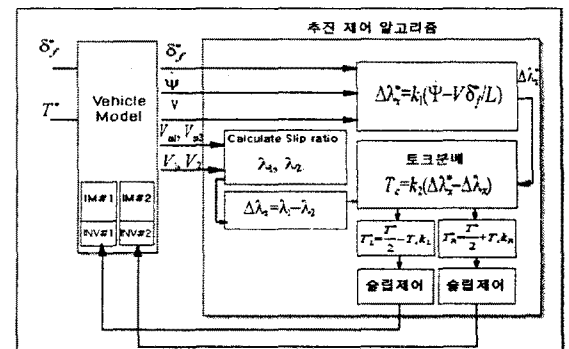


그림 2 주행저항력

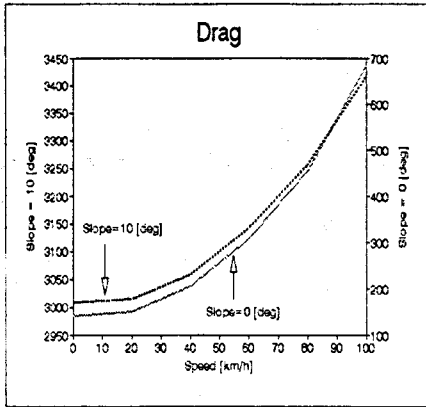
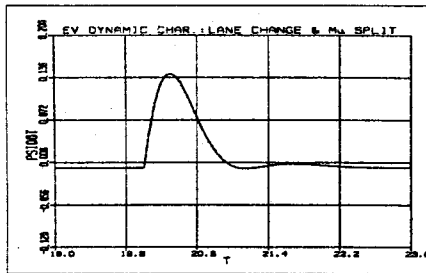


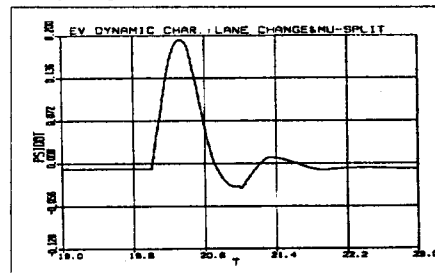
표2 파라미터 정의

|  |  |                             |
|--|--|-----------------------------|
| A : 차량 투영면적  | d : 몸거의 1/2                              | F <sub>c</sub> : 원심력        |
| I : 관성모멘트  | M : 차량 질량                                | F <sub>x</sub> : 진행방향 타이어 힘 |
| $\delta_i$ : 조향각   | $\psi$ : 요 각                             | g : 중력가속도                   |
| $\dot{\psi}$ : 요 각속도                                     | V <sub>w</sub> : 차량진행속도                  | T <sub>i</sub> : 구동 전동기 토크  |
| r : 차량 반경  | $\lambda_i$ : 미끄럼 비                      | I <sub>w</sub> : 차량의 관성 모멘트 |
| l <sub>f</sub> , l <sub>r</sub> : 차량의 무게중심에서 앞·뒤 차축간의 거리 | $\mu$ : 구름 저항계수                          | $\dot{y}$ : 측면방향 가속도        |
| $\mu$ : 구름 저항계수  | $\dot{y}$ : 측면방향 가속도                     | m <sub>i</sub> : 바퀴당 차량 질량  |
| F <sub>y</sub> : 측면방향 타이어 힘                              | $\beta$ : 차량측면미끄럼각                       | $\dot{x}$ : 진행방향 가속도        |
| X <sub>i</sub> : 진행방향 노면과 타이어 사이의 상호 작용력                 | Y <sub>i</sub> : 측면방향 노면과 타이어 사이의 상호 작용력 |                             |
| $\Delta\lambda_x$ : 실제 진행방향 미끄럼 차                        | $\Delta\lambda_x^*$ : 기준 진행방향 미끄럼 차      |                             |
| $\Delta\lambda_x^*$ : 기준 진행방향 미끄럼 차                      | $\rho$ : 차량의 곡률 반경                       |                             |

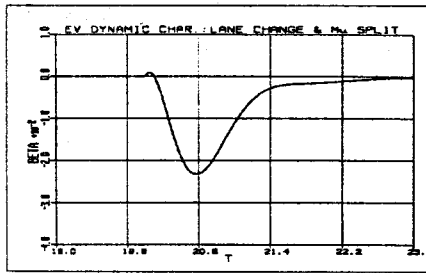
그림3 선회시 동특성 비교(차선변경 및  $\mu$ -split 조건)



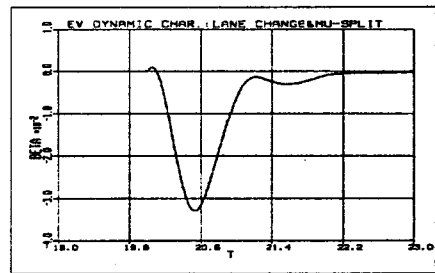
(a) 요각속도 ( $\psi$ )



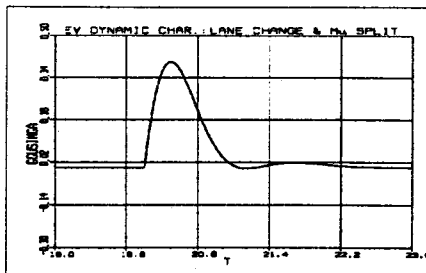
(a) 요각속도 ( $\psi$ )



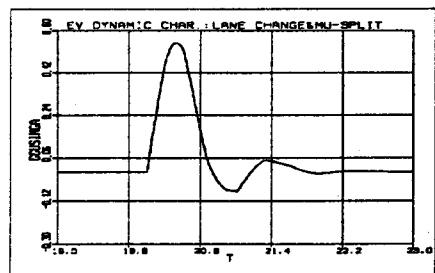
(b) 미끄럼각 ( $\beta$ )



(b) 미끄럼각 ( $\beta$ )



(c) 구심가속도 ( $G_{gusimga}$ )



(c) 구심가속도 ( $G_{gusimga}$ )