

Multimotor 구동방식 전기자동차 운전제어 시뮬레이터 개발에 관한 연구

김병기, 김재화, 장태규, 박정우*, 하희두*
 중앙대학교 제어계측공학과
 *한국전기연구소

A Study on the Development of a Simulator for a Multimotor driven Electric Vehicle

Byung-Ki Kim, Jae-Hwa Kim, Tae-Gyu Chang, Jung-Woo Park*, Hoi-Do Ha*
 Dept. of Control & Instrumentation Eng., Chung-Ang Univ.
 *Korea Electrotechnology Research Institute.

Abstract

This paper describes a driving simulator for the multimotor driven electric vehicle. The electric vehicle is simulated by a 7-DOF(degree of freedom) model and a couple of developed split torque control algorithms are tested with the simulator to illustrate and verify its normal operation.

1. 서론

환경문제에 대한 관심이 증대됨에 따라, 축전지와 전기 모터에 의해 구동되는 전기자동차의 개발은 전 세계적 관심 대상이다. 특히 전기자동차(Electric Vehicle)의 유용성과 응용 가능성에 대한 많은 논의가 실 모델의 개발로 성과를 나타냄으로서, 전술용 차량(Combat Vehicle)이나 험지 주행용 차량(Tough-road Vehicle)과 같은 특수 목적용 전기 자동차의 개발도 가속화되고 있다[1]. 이에 따라 국내의 자동차 제조 업체들은 현재 가능한 범위내에서 기존의 전지 및 모터 제어 기술을 바탕으로 단일 모터 구동방식 전기자동차를 구현하고 있다. 반면 motor 2대 혹은 4대의 multimotor 구동 방식을 채택하는 전기자동차는 단일 모터 구동방식 전기자동차에 비하여 각 차륜의 제어가 독립적으로 이루어지므로 특수 기능을 쉽게 수행할 수 있고, 기계 구조의 감소로 중량이 감소된다. 즉, 축별 제어에 따라 추진제어, 선회제어, cruise control, ABS(Anti-lock Braking System), TCS(Traction Control System)등을 위한 제어의 원활성을 극대화 할 수 있고, 차동기어, ABS solenoid 등의 부가적인 기계 장치가 불필요하여 신뢰성 제고 및 경제성 제고에 크게 기여할 수 있다[2][3][4]. 따라서 각 차륜 Slip 및 차속 추정 정보 등을 바탕으로 multimotor구동 방식에 적합한 추진제어를 비롯한 운전제어 알고리즘들을 개발하는 것은 multimotor구동 방식이 가지고 있는 장점들을 살리기 위해서 매우 중요한 사항이다. 하지만 이러한 알고리즘들을 실차 상황에서 시험하는 것은 물리적으로 극히 제한된 범위에서만 가능하여 다양한 시험 환경에 대한 시도에 제약이 따른다. 본 논문에서는 multimotor구동 방식 전기 자동차 시스템을 개발하기 위한 여러 제어 알고리즘들을 실제 상황과 같이 묘사하여 시험할 수 있도록 하여주는 운전제어 시뮬레이터를 기술하고 몇 가지 제어 알고리즘을 적용시켜 시뮬레이터의 정상적인 동작을 확인하였다.

2. 전기자동차의 Dynamics Modeling

본 논문에서는 multimotor 구동방식 전기 자동차의 dynamics를 7차 model을 이용하여 기술하였다. 차량의 정면 방향 속도, 차량의 측면 방향 속도, 차량의 회전 각속도, 각 차륜(tire)의 회전 각속도를 state로 설정하였다. Multimotor구동방식 전기 자동차의 Simulator구성을 위한 차량의 7차 Dynamics model을 그림1에 보였다. 그림2는 차륜의 model로 차량의 x방향과 차륜의 정면 방향은 steering angle(δ)만큼 각을 이룬다. 1과 2의 차륜은 steering이 가능하지만 3과4의 차륜은 후륜이므로 δ 값은 0이다. 차륜의 실제 진행방향과 차륜의 정면 방향이 이루는 각을 slip angle이라 한다. 그림 1과 그림2에 나타난 변수들을 표1에 정리하였다.

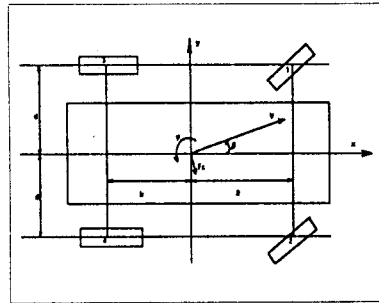


그림1. 차량의 Model.

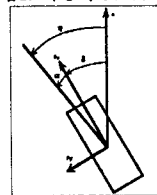


그림 2. 차륜의 Model.

d	distance from vehicle center line to one half a tire tread	I	moment of inertia
g	acceleration of gravity	M	vehicle mass
v	vehicle velocity	h	height from roadway to c.g.
α_i	wheel slip angle	l_i	distance from center of mass to each axle
β	vehicle side slip angle	δ_i	steering angle
x	longitudinal position	ρ	radius of curvature
y	lateral position	ϕ	yaw angle
F_{x_i}	longitudinal tire force	F_{y_i}	lateral tire force

표 1. 차량model의 변수 명명

차량의 정면방향(X방향)의 가속도는 각 차륜에서 발생하는 정면방향 힘 성분과 원심력의 정면방향 힘성분의 합으로부터

$$\ddot{x} = \frac{F_{km_1} + F_{km_2} + F_{km_3} + F_{km_4} + F_C \sin \beta}{M} \quad (1)$$

을 얻는다. M은 차량의 총질량, F_C 는 원심력, β 는 Side Slip angle이다. F_{km_i} 는 차륜과 노면으로부터 발생하는 힘 F_{x_i} 와 F_{y_i} 에 의해 wheel steering angle(δ_i)만큼 환산한

$$F_{km_i} = F_{x_i} \cos \delta_i - F_{y_i} \sin \delta_i, \quad (i = 1 \dots 4) \quad (2)$$

이다. X방향 가속도와 마찬가지로 축면 방향 가속도는

$$\ddot{y} = \frac{F_{lat_1} + F_{lat_2} + F_{lat_3} + F_{lat_4} - F_C \cos \beta}{M} \quad (3)$$

$$F_{lat_i} = F_x \sin \delta_i + F_y \cos \delta_i, \quad (i = 1 \dots 4) \quad (4)$$

를 얻는다. Yaw 방향의 회전운동은 무게 중심으로부터 거리와 각 차량의 위치에 의해

$$\ddot{\psi} = \frac{l_1(F_{lat_1} + F_{lat_2}) - l_2(F_{lat_3} + F_{lat_4}) - d(F_{br_1} + F_{br_2}) + d(F_{br_3} + F_{br_4})}{I} \quad (5)$$

을 얻는다. 여기서 I는 yaw 운동의 Inertia moment이다. 차량의 X방향 힘 F_x 와 Y방향 힘 F_y 는 차량과 노면 사이의 마찰 계수 μ 와 하중 M_w 와 중력 가속도 g 의 함수로 나타난다.

$$F_x = M_w \mu_x g \quad (6-a)$$

$$F_y = -M_w \mu_y g \quad (6-b)$$

지면과 차량 사이의 마찰계수 μ_x 와 μ_y 는 일반적으로 Slip ratio λ 에 따라 그림 3.의 비선형적인 곡선을 갖는다[5].

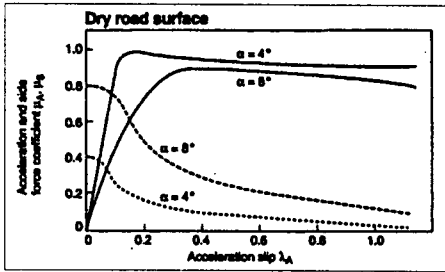


그림 3. Slip ratio에 따른 마찰계수의 변화

Slip ratio λ 는 다음과 같이 정의된다[2].

$$\lambda_i = \frac{V_{w_i} - V_i}{V_{w_i}} \quad (V_{w_i} \geq V_i) \quad (7)$$

$$\frac{V_{w_i} - V_i}{V_i} \quad (V_{w_i} < V_i)$$

차량의 각 차량 방향의 속도는 x방향 가속도, y방향 가속도 외에 yaw성분의 영향을 고려하면

$$V_1 = \sqrt{(\dot{x} - d\dot{\psi})^2 + (\dot{y} + l_f\dot{\psi})^2} \cos \alpha_1 \quad (8-a)$$

$$V_2 = \sqrt{(\dot{x} + d\dot{\psi})^2 + (\dot{y} + l_r\dot{\psi})^2} \cos \alpha_2 \quad (8-b)$$

$$V_3 = \sqrt{(\dot{x} - d\dot{\psi})^2 + (\dot{y} - l_f\dot{\psi})^2} \cos \alpha_3 \quad (8-c)$$

$$V_4 = \sqrt{(\dot{x} + d\dot{\psi})^2 + (\dot{y} - l_r\dot{\psi})^2} \cos \alpha_4 \quad (8-d)$$

이 된다. 차량의 slip angle은 α_i 로서

$$\alpha_i = \eta_i - \delta_i \quad (9)$$

로 된다. 차량의 이동 방향(η_i)는 식(10)과 같다.

$$\eta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + l_f\dot{\psi}}{\dot{x} - d\dot{\psi}} \right) \quad (10-a)$$

$$\eta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} + l_r\dot{\psi}}{\dot{x} + d\dot{\psi}} \right) \quad (10-b)$$

$$\eta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} - l_f\dot{\psi}}{\dot{x} - d\dot{\psi}} \right) \quad (10-c)$$

$$\eta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{y} - l_r\dot{\psi}}{\dot{x} + d\dot{\psi}} \right) \quad (10-d)$$

차량의 원심력에 의한 질량 변화를 고려하면 각 차량의 질량은 다음으로 나타내 진다.

$$M_{w_i} = \frac{l_j}{2(l_j + l_i)} \left(M - \frac{h}{d} \frac{F_c}{g} \right) \quad (11-a)$$

$$M_{w_i} = \frac{l_j}{2(l_j + l_i)} \left(M + \frac{h}{d} \frac{F_c}{g} \right) \quad (11-b)$$

$$M_{w_i} = \frac{l_r}{2(l_r + l_i)} \left(M - \frac{h}{d} \frac{F_c}{g} \right) \quad (11-c)$$

$$M_{w_i} = \frac{l_r}{2(l_r + l_i)} \left(M + \frac{h}{d} \frac{F_c}{g} \right) \quad (11-d)$$

F_c 는 원심력으로 차량 속도 V 와 회전 반경 ρ 로부터 다음과 같다.

$$V = \rho(\dot{\psi} + \beta) \quad (12)$$

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

각 차량에서 선가속도는 아래와 같다.

$$I_w \frac{V_{w_i}}{r_w^2} = \frac{T_i}{r_w} - F_x \quad (13)$$

이상 식(1)-(13)에 전기자동차를 7-DOF(seven Degree of Freedom) dynamics model을 이용하여 기술하였다.

3. 운전제어 Simulator의 구성

운전제어 시뮬레이터는 다양하게 운전환경을 설정하고 새로운 추진제어 algorithm이 개발되었을 때 algorithm을 실험하고 검증해 볼 수 있도록 하여준다. 운전제어 시뮬레이터는 단순 입력에 대한 차량의 반응 정도를 보이는 Open Loop구성만이 아니라 실제 운전자까지 함께 포함하여 전체 시뮬레이션을 Closed Loop로도 구성할 수 있도록 하였다. 운전제어 시뮬레이터는 E.V. dynamics, 운전환경 설정기, 운전자 model, interface 및 display부로 구성되며 각 부분의 기능은 아래에 요약하여 기술하였다.

E.V. dynamics model은 본 논문에서 기술한 7DOF dynamics model과 motor dynamics, inverter, battery로 구성된다. 운전자는 외부로부터 시각, 소리, 가속도, 속도 등의 정보를 종합적으로 받아들여 가고자 하는 방향으로 차를 운행하기 위한 핸들링각, Accel, Brake angle을 결정한다. 이와 같은 역할을 해주는 시뮬레이션 상의 운전자를 구성하였다. 이 운전자 Model은 차량을 운전하여 여러 제어 알고리즘을 Test하도록 하여준다. 본 논문에서 선정된 운전자 Model은 아래와 같다.

$$y_e = y_d - (y + \hat{y})$$

$$\hat{y} = K_1 v_r \sin(\psi)$$

$$\delta = K_2 y_e$$

y_d : T초후의 원하는 y position. y : 현재의 y position.

\hat{y} : T초후 추정되는 y의 변화량. ψ : 현재의 yaw rate.

운전환경 설정기는 시뮬레이션 상에서 길의 유형, 노면 상태, 풍향, 풍속등을 설정하도록 하여준다. 노면 환경 설정은 도로면 friction coefficient를 다르게 설정할 수 있도록 하여준다. Interface 및 display부는 각 부분으로부터 data를 받아 화면에 출력하도록 구성하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

2절에서 기술한 7DOF dynamics model, 3절에서 기술한 운전자 model, 및 split torque 제어 algorithm을 이용하여 본 연구에서 구현한 시뮬레이터의 동작을 확인하기 위한 목적으로 적용 시험을 수행하였다.

E.V. Dynamics Parameter는 시뮬레이션의 동작 및 타당성을 입증하기 위해 한국전기연구소에서 개발한 2-motor구동방식 전기자동차를 대상으로 했다.

$$\begin{aligned} l_j: 0.472 \text{ m} & \quad l_r: 0.392 \text{ m} & a: 0.252 \text{ m} & \quad h: 0.025 \text{ m} \\ I: 5 \text{ kgm}^2 & \quad M: 50 \text{ kg} & I_w: 0.25 \text{ kgm}^2 & \quad r_w: 0.0475 \text{ m} \end{aligned}$$

운전 환경 설정은 노면의 상태를 정상적인 경우와 빙판의 미끄러운 경우를 각각 설정하였다. 정상인 경우는 노면과 차륜 사이에 마찰 계수가 그림 3과 같은 비선형 특성곡선을 갖는데 이를 그림 4.(실선)로 modeling하였다. 그림 4.(점선)는 빙판의 미끄러운 경우를 modeling한 것으로 정상적인 경우의 절반으로 설정하였다.

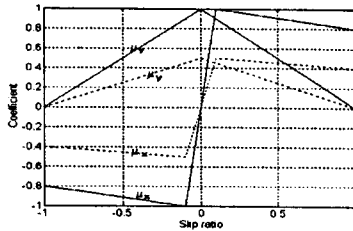


그림 4. 정상(실선) 및 빙판(점선) 노면의 차륜 slip ratio에 따른 μ_x, μ_y

제어 Algorithm은 기존 엔진 구동방식 또는 One-motor구동방식 차량에 사용되는 차동기어의 역할을 Multimotor구동방식 전기자동차에서 똑같이 수행하는 Algorithm을 ECU에 넣어 시뮬레이션하였다. 즉, 동력원으로부터 전달되는 Torque는 차륜의 회전 Speed에 상관없이 양 차륜에 똑같이 공급하였으며 이를 'Algorithm-1'이라 칭하였다.

차동기어는 Cornering시 회전의 안쪽 차륜에 더 적은 Torque를 주고 외부의 차륜에 많은 Torque를 주어 더 나은 성능을 발휘하도록 개선되어 왔으며 이들 중 아래의 Algorithm을 적용하였다.

$$\Delta S_r = K_1(r - v \frac{\delta}{l})$$

$$T_c = K_2(\Delta S_r - \Delta S_r)$$

ΔS_r : 좌우 차륜의 실제 Slip차. K_1, K_2 : 비례 상수.

T_c : 좌우 차륜에 공급하는 Torque의 차. l : 차량의 전장 길이. 이 경우 실제 가해 주는 Torque는 위의 Ideal 차동기어가 주는 Torque T외에 추가적으로 $T_c/2$ 가 좌우 차륜에 가감되어 전달되며 이러한 제어 방식을 'Algorithm-2'로 칭하였다.

운전자 Model이 없는 Open Loop Test로서 전륜의 Steering Angle δ 를 Step Input을 가했을때의 yaw rate ($\dot{\phi}$)의 반응을 그림 5에 나타내었다. 1에서 15초 사이에는 Accel을 최대로 밟아 가속을 하고 이후 15초에서 Accel을 0으로 떨어뜨리면서 Steering Angle을 0°에서 3°로 변경하였다. 이 Test는 Handling에 따른 차량 회전의 반응이므로 반응이 빠를수록 조작성이 우수하다 할 수있다. 정상노면에서 Step Input에 대한 yaw rate의 변화는 그림 5의 실선 A로 나타내었다. 좌측이 정상노면(그림 4의 실선)이고 우측이 미끄러운 노면(그림 4의 점선)인 길에 Algorithm-1을 적용했을때의 반응을 점선 C로 나타내었다. 위와 같은 μ -split 상황에서 Algorithm-1 대신 Algorithm-2를 적용하여 얻은 결과를 점선 B로 나타내었다. 여기서 시뮬레이션 결과 Algorithm-2가 Algorithm-1 보다 높은 수치를 보임으로서 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

이상의 Test는 차량만을 Modeling하여 얻은 결과이고 본 논문에서 제시한 운전자 Model을 포함하여 Closed Loop Test결과는 그림 6에 나타내었다. 이 상황은 운전자가 차선을 변경하는 과정에서 15초까지 최대 Torque로 가속한 후 15초부터 Torque를 반으로 줄이고 차선을 변경하였다. 시간에 따른 y의 값의 변화가 보여지고 있다.

이상의 split torque 제어 Algorithm과 운전환경설정을 적용하여 수행한 결과를 통하여, 본 연구에서 구현한 시뮬레이터는 정상적인 동작을 하는 것을 확인할 수 있었다.

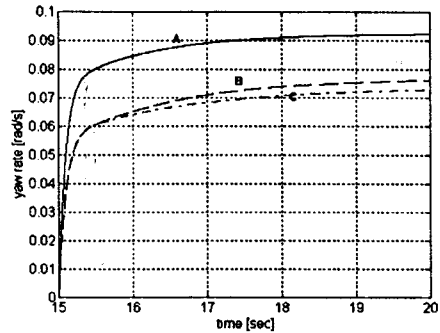


그림 5. μ -split 상황에서 제어 Algorithm 비교 예.

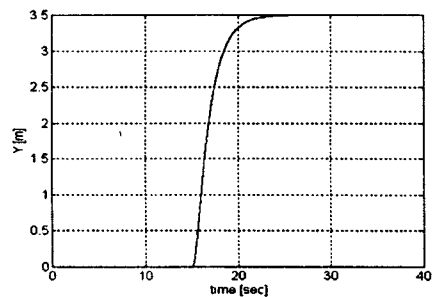


그림 6. 운전자 model을 포함한 closed loop test 예.

5. 결론

본 논문에서는 multimotor 구동방식을 채택한 전기자동차에 대하여 다양한 제어 algorithm과 운전상황을 설정하여 동작을 실현하기 위하여 개발한 운전제어 시뮬레이터에 관하여 기술하였다. 전기자동차 dynamics는 7DOF model을 이용하여 구현하였다. 본 논문에서 제안한 운전자 model 및 split 제어 algorithm을 적용하여 수행한 시뮬레이션 결과를 통하여, 구현한 시뮬레이터가 정상적인 동작을 하는 것을 확인하였다. 앞으로 display interface를 포함한 운전제어 시뮬레이터 각 구성요소에 대한 개발을 진행하여 통상용용이 가능한 형태로 구현하기 위한 연구를 계속 수행할 필요가 있다.

6. 참고문헌

- [1] 대한 전기학회 전기 자동차 기술 조사 전문 위원회, "제 6호 전기자동차 기술현황: 기술 조사 보고," 1992년 11월, 제 6호.
- [2] Matsumoto, N., Tomizuka, M., "Vehicle Lateral Velocity and Yaw Rate Control With Two Independent Control Inputs.", *Transaction of the ASME*, Vol. 114, pp. 606-613, December, 1992.
- [3] Whitehead, J.C., "Four Wheel Steering: Maneuverability and High Speed Stabilization", SAE paper 880642, 1988.
- [4] Matsushita, Y., Yuhara, N., and Arato, Y., "Modeling of Vehicle Improvement of Handling Quality by Adaptive Four-Wheel Steering Control System", *Transaction of JSAE*, No.36, 1986.
- [5] Ronald Jurgen, *Automotive electronics handbook*, McGraw-Hill, 1994.
- [6] Guo, K.H., and Guan, H., "Modeling of Driver/Vehicle Directional Control System", *Vehicle System Dynamics*, vol 22, pp.141-184, 1993.
- [7] MacAdam, C.C., "Application of an Optimal Preview Control for Simulation of Closed Loop Automobile Driving", *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol., SMC-11 no.6, June, 1981.