

독립 구동형 전기자동차의 연구동향과 운전제어기술

박정우*, 김종무**, 김흥근***

(*전기연구소 선임연구원, **동 연구원, ***경북대 전기공학과 교수)

1. 서 론

전기자동차에서의 핵심 기술은 주행거리 향상과 경량화로 요약되며, 전지 분야에서의 고출력밀도와 고에너지 밀도를 갖는 전지 개발과 더불어, 전동기 분야에서는 고출력 밀도와 고효율 특성을 갖는 전동기 개발에 대한 연구가 국·내외적인 주요 연구 분야이다.

전기자동차는 크게 전동기만으로 구동되는 순수 전기자동차와 하이브리드 전기자동차로 구분되며, 순수 전기자동차는 구동력을 담당하는 전동기 수에 따라 한 대의 전동기로 구동되는 일반적인 형태와 2대 혹은 4대로 구동되는 다중전동기 구동형으로 구분될 수 있다. 독립 구동형 전기자동차는 다중전동기 구동형 전기자동차의 다른 표현이다.

국외에서 독립 구동형 전기자동차로 개발된 전기자동차로는 일본의 동경전력에서 4모터 구동형으로 개발한 IZA, 독일의 아헨(Ahen) 공대에서 2모터 구동형으로 개발한 CITYBUS, 미국의 GM에서 2모터 구동형으로 개발한 IMPACT, 그리고 독일 마그네트모터에서 발전기나 프라이휠 저장장치를 가지면서 4모터 구동형으로 개발한 NEOPLAN N4114/N6020/N4121 등이 있다.

국내에서 독립구동형 전기자동차에 대한 연구로는 한국전기연구소에서 2모터 구동형으로 개발한 시제품이 있으며, 서울대에서 4모터 구동 시스템에 대한 구동 기술 연구가 진행된 바 있다.

전동기 2대 구동형 전기자동차는 전동기 한 대로 구동되는 전기자동차와는 다르게 좌우 구동 바퀴에 전용의 전동기가 각각 구동을 담당하는 시스템으로, 독립적으로 좌우 구동륜을 제어할 수 있어 주행 특성을 개선시킬 수 있는 자유도를 가지고 있으며, 전동기 한 대로 구동되는 전기자동차에서 필요로 하였던 차동기어(Differential Gear)와 동력전달 요소

(Axle)를 제거할 수 있기 때문에 차체를 경량화시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 대상 차에 대한 사양이 결정되면 요구되는 속도대 토크 사양을 2대의 전동기로 분담하기 때문에 상대적으로 소형 전동기로 추진시스템을 구축할 수 있으며, 궁극적으로 바퀴에 전동기를 내장하거나 부착하는 추진시스템 구축을 가능하게 하여 조밀 구조화가 가능해지고, 전동기에 의한 무게중심을 대칭적으로 낮게 분산시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.



(a) 전동기 4대 구동형



(b) 전동기 2대 구동형(프라이휠 저장장치 구비)

그림 1 마그네트모터의 독립구동형 전기자동차(국외)

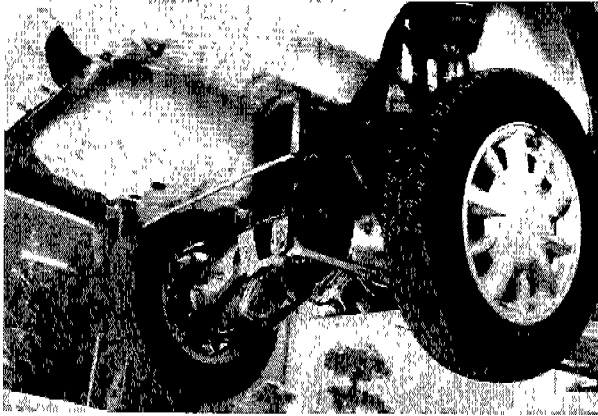


그림 2 동기전동기 2대로 구동되는 독립구동형 전기자동차(국내)

독립 구동형 전기자동차에는 전동기 한 대로 구동되는 전기자동차와 비교할 때 많은 장점을 가지고 있지만 가속 페달로부터 들어오는 한 개의 토크 지령치를 구동 전동기 수에 맞도록 분배해 주면서 차동기어를 이용하는 전동기 한대 구동형 전기자동차보다 우수한 운전 특성을 갖도록 하는 규칙이 필요하다. 또한 분배된 좌·우측의 토크 기준치를 추종하도록 토크 제어 모드로 인버터를 운전하는 조건에서도 노면 조건에 따라 차량에 인가되는 구동력의 특성은 달라지게 된다. 이러한 관계는 그림 3에 나타낸 슬립율에 따른 노면의 마찰 계수 변화로부터 알 수 있다. 슬립율이 일정 범위 이상이 되도록 전동기에서 구동력을 발생하게 되면 오히려 진행 방향으로의 마찰 계수(μ_x)가 작아지게 되는 영역으로 들어가게 되며, 주행 안정성에 관계되는 횡방향으로의 마찰 계수(μ_y)도 급격히 저하되는 특성을 갖는다. 그런데 이러한 마찰 계수 변동 곡선이 주행 노면 조건(빙판길, 빗길, 아스팔트길, 자갈길)에 따라 기울기와 최대 크기가 같지 않고 함수로 정의하기가 어렵다. 따라서 안정된 슬립율 범위에서

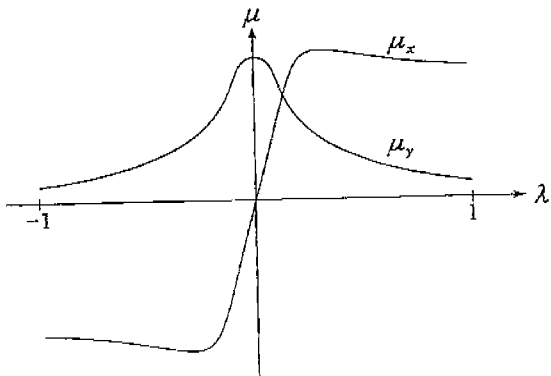


그림 3 슬립율에 따른 마찰계수

운전 되도록 분배된 기준 토크를 약화시켜 줄 필요가 있다.

전기자동차의 견인용 전동기에는 많은 후보가 있다. 유도전동기는 다른 종류의 전동기에 비하여 구조적으로 튼튼하며, 제작이 용이하다는 장점이 있으나 영구자석형 전동기에 비해 효율, 속응성, 그리고 출력 밀도가 낮은 단점이 있다. 영구자석형 전동기는 계자에 해당되는 자속 성분이 외부 전원에 의하지 않고, 영구자석에 의해 공급되어 전력 소모를 최소화하여 전체 시스템의 효율을 향상시키는데 유리하다. 전동기의 단위 무게당 출력을 나타내는 출력 밀도는 다른 전동기와 비교할 때 월등히 높으며, NdFeB와 같이 에너지 밀도가 높은 자석 재료의 개발로 적은 체적으로 큰 토크를 발생시킬 수 있게 되어 소형·경량화·고출력·연비향상 관점에서 주목을 받고 있다. 영구자석형 전동기 중에서 자석토크 성분과 킬턴스 토크 성분을 모두 가지는 매입형 영구자석 동기전동기가 고출력 밀도와 경량화에 더욱 유리하다.

따라서 독립 구동형 전기자동차에서의 운전 특성을 개선하기 위한 방법과 전기자동차의 견인용 전동기로서 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)를 적용하였을 때의 제어 방법에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 운전 제어기

2.1 토크 분배

직진 주행 모드에서는 좌우 구동륜의 구동 토크를 균등 분배 해 줌으로써 좌우 구동륜에서의 토크를 동일하게 갖도록 해주고, 선회시에는 좌우 구동륜의 토크를 다르게 분배함으로써 차등토크 성분에 의한 요잉모멘트(yawing moment)를 발생시켜 선회 조종성을 향상시키자는 것이다. 좌우 구동륜의 토크 기준치의 차이를 T_c 라고 하고, λ_L 과 λ_R 은 좌우 구동륜에서의 슬립율을 나타내며, ϕ 는 요각속도, δ_r 는 조향각, V 는 차속, V_r 는 좌우바퀴속도, T^* 는 토크기준치를 각각 나타낼 때 운전 상태에 따라 좌우 구동륜의 토크 기준치는 수식(1)과 같이 분배함으로써 선회 조종성을 향상시킬 수 있다.^(2,3)

$$T_c = k_2 (\Delta \lambda_x^* - \Delta \lambda_y) \quad (1)$$

여기서

$$\Delta \lambda_x^* = k_1 \left(-\frac{V}{L} \delta_r \right) \quad (2)$$

$$\Delta \lambda_x = \lambda_L - \lambda_R \quad (3)$$

$$\begin{cases} \lambda_L = \frac{V_3 - V}{V_3}, \lambda_R = \frac{V_4 - V}{V_4} \text{ (for } V_i \geq V) \\ \lambda_L = \frac{V_3 - V}{V}, \lambda_R = \frac{V_4 - V}{V} \text{ (for } V_i < V) \end{cases} \quad (4)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 제어기에서 조절하는 이득을 나타낸다. 이때 좌측으로 선회시 좌·우 구동륜의 기준 토크는 수식(5)와 (6)으로 설정할 수 있다.

$$T_L^* = \frac{T^*}{2} - T_c \quad (5)$$

$$T_R^* = \frac{T^*}{2} + T_c \quad (6)$$

분배된 토크 식으로부터 좌우 구동륜에 걸리는 토크 차이 (ΔT^*)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta T^* &= T_R^* - T_L^* \\ &= 2 \left\{ k_1 k_2 \left(\psi - \frac{V \delta_f^*}{L} \right) - k_2 \Delta \lambda_x \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 토크약화제어

토크약화 방법에는 슬립율이 일정한 범위에서 운전 될 때는 토크를 약화시키지 않고, 한계 범위(보통 0.10~0.15)를 벗어나면 점진적으로 약화시키는 방법을 사용 할 수 있으나 노면 조건에 따라 최대치가 다르고, 떨어지는 기울기도 각각 다르며, 동일 노면 조건에서도 바퀴의 슬립각에 따라 마찰계수가 달라지는 특성을 가지고 있기 때문에 고정된 수식으로 모델링하기가 어렵다. 따라서 퍼지제어기를 접목하여 슬립율과 슬립율의 미분치에 근거하여 약화 정도를 결정하도록 설계할

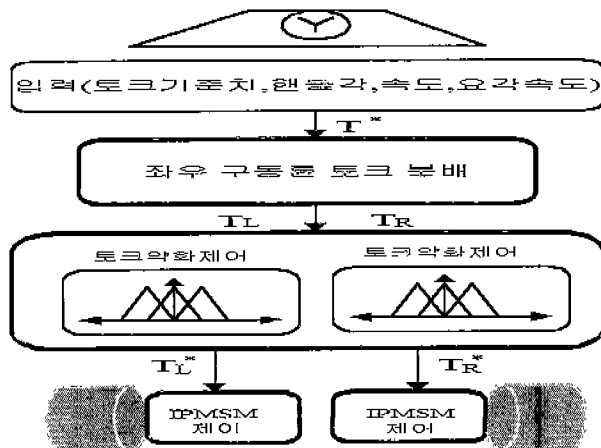


그림 4 추진제어 알고리즘구성도

수 있다.^[2] 좌·우 구동륜 토크분배 제어기와 토크 약화제어기, 그리고 매입형 영구자석 동기전동기 제어기로 구성된 전체 구성도는 그림 4와 같다.

2.3 전동기 제어 장치

2.3.1 전기자동차 운전 특성

전기자동차 특유의 운전 특성을 인버터에서 수용 가능 할 때 전기자동차 용도로의 우수한 제어 특성을 가질 수 있기 때문에 운전특성을 고려한 IPMSM의 제어기 구성에서 고려할 사항은 다음과 같다.

첫째, 전기자동차는 기동시 가속 특성이 우수해야하고, 정토크 영역에서의 최대 전류는 정적전류의 2배에서 4배까지 되는 큰 부하 변동률을 갖는 운전 특성을 가지므로 정토크 영역에서는 가속 능력을 최대로 발휘하기 위해서는 단위 전류당 최대 토크제어 기법이나 단위 위상각당 최대 토크 제어 기법을 적용하는 것이 고효율 제어나 역률 1 제어 방식 보다 유리하다.

둘째, 정출력 영역에서의 제어는 전기자동차에서 사용되는 구동전류가 매우 크기(200A 이상) 때문에 고정자 저항이 비록 작더라도(수십 mΩ) 고정자 저항 성분 때문에 생기는 전압 강하 성분(약 10 Volt 이상)을 무시할 수가 없다. 따라서 고정자 저항 성분에 의해서 생기는 전압강하 성분을 고려한 약제자 제어가 적합하다.

셋째, 부하의 크기(전류 크기)에 따라 기저 속도가 크게 변동되는 특성 때문에 절대 정토크 영역과 절대 정출력 영역 사이에 정토크 영역과 정출력 영역이 공존하는 주파수 영역을 설정한 후 전압의 포화 유무에 따라 영역을 결정하여 제어하는 방식이 적합하다.

넷째, 정토크 영역과 정출력 영역에서 계산하는 기준 전류는 IPMSM의 등가 파라미터인 L_d 와 L_q 를 이용하여 계산되는데, 이들 파라미터는 부하(전류의 크기)와 운전 속도(전류위상각)에 따라 크게 변동되는 파라미터 변동 특성을 고려해 주어야 전류 제어기의 특성과 속도 추종성을 개선시킬 수 있다.

2.3.2 파라미터 변동을 고려한 벡터제어

기존의 방식^[4]에서는 L_d 와 L_q 의 변동을 전류의 크기만의 함수로 전제하고, 직선의 방정식으로 모형화하여 보상하는 방법을 적용할 수 있으나, L_d 와 L_q 에 대한 파라미터 변동을 전류의 크기뿐만 아니라 전류 위상각을 함께 고려하여 3차원 곡면 내에서 비선형으로 변동되는 특징을 벡터제어 알고리즘에 접목시키는 것이 전기 자동차 용도로 사용되는 IPMSM의 제어 특성을 향상시키기 위해서 매우 중요하다.

따라서 전류 크기와 전류 위상각에 따른 L_d 와 L_q 변동 특성을 신경 회로망을 이용하여 추정기를 구성한 후 이를 벡터 제어기법과 결합하여 전류제어기의 파라미터를 보정해주는

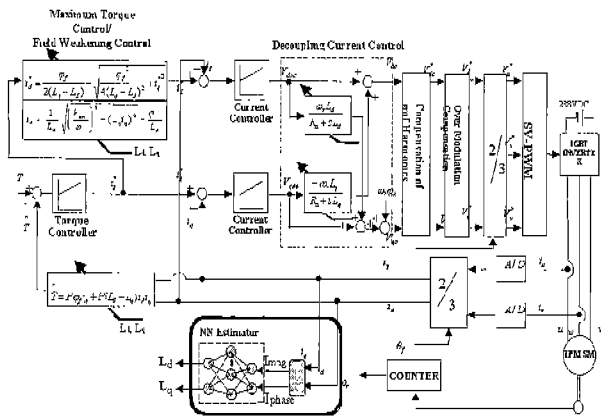


그림 5 신경회로망 추정기를 갖는 IPMSM용 벡터제어 구성도

매입형 영구자석 동기전동기벡터제어 알고리즘으로 전류제어기 특성을 개선시킬 수 있다.⁽⁵⁾

3. 결 론

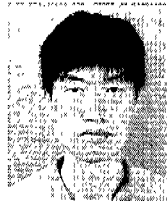
독립구동형 전기자동차에 대한 개발 사례에 대하여 간략하게 소개하고, 독립구동형 전기자동차의 동특성을 향상시킬 수 있는 운전 제어 방법에 대한 연구 결과를 소개하였다. 독립구동형 전기자동차는 전기자동차 용도로 디젤이나 가스엔진 발전기가 개발되고 프라이휠 저장 장치가 개발되면 상용화가 될 것으로 전망되며 군수용으로 응용될 가능성이 높다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 박정우, 구대현, 김종무, 전기자동차용 바퀴일체형 전동기 및 제어기 개발, 한국전기연구소보고서, 1998.
- [2] Jung-Woo Park, Dae-Hyun Koo, Jong-Moo Kim, and Heung-Geun Kim, "High Performance Drive Unit for 2-motor Driven Electric Vehicle," IEEE APEC'99, pp.443-449, 1999.
- [3] C.Doniselli,G.Mastinu.R. Cal. "Traction Control for Front-Wheel Drive Vehicles", Vehicle System Dynamics, PP.87-103,1993.
- [4] Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, and Yoji Takeda, "Effects and Compensation of Magnetic Saturation in Flux-Weakening Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 30, No. 6, pp. 1632~1637, 1994.

- [5] 박정우,하희두,김흥근, "독립 구동형 전기자동차의 추진 시스템 제어 기법," 전력전자학회논문지,제4권 4호, 1999.

<저 자 소 개>



박정우(朴正雨)

1963년 2월 5일생. 1986년 충남대 공대 전자공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 경북대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년~현재 한국전기연구소 메카트로닉스연구그룹 선임연구원.



김종무(金鍾武)

1970년 1월 4일생. 1992년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~현재 한국전기연구소 연구원.



김흥근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1990년~1991년 미국 Wisconsin대학 전기공학과 객원교수. 현재 경북대 전자 전기공학부 교수. 당 학회 총무이사.

교수. 당 학회 총무이사.