

전동기의 최대효율제어에 의한 전기자동차의 주행거리 증대

최옥돈, 박영우, 김연준, 이종찬

현대중공업(주) 기술개발본부 기전연구소 산업전자연구실

The Traveling Distance Increase of Electric Vehicle with Maximum Efficiency Control of Traction Motor

U.D. Choi, Y.W. Park, Y.J. Kim, J.C. Lee

Industrial Electronics Division, Mechatronics Research Institute,
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to evaluate practical advantage in using maximizing efficiency control strategy in induction motor drives for electric vehicles. A maximizing efficiency control strategy consist of a flux estimation with direct field oriented controller is proposed and compared with the general constant flux control strategy. The comparison is carried out by experimental results and simulation of the behavior of electric vehicles. Results are included to show the effectiveness of the proposed strategy in the electric vehicle applications.

1. 서론

전기자동차는 배기가스에 의한 대기오염이 없고, 수급 에너지의 측면에서도 석유뿐만 아니라 원자력, 수력, 태양열 등으로 다양화 할 수 있다는 장점이 있어서, 최근 환경문제와 에너지 대책의 일환으로 실용화의 필요성이 증대되고 있다. 전기자동차용 견인전동기는 일반적인 산업용 전동기와는 달리 400% 정도의 순시 최대토크능력, 견고성, 고속운전, 저소음, 소형, 경량화, 제어의 편이성, 저가격 등의 조건을 만족해야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 유도전동기를 사용한 벡터제어의 방식을 적용하는 것이 가장 최적의 전기자동차 시스템을 구성할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 일반적인 벡터제어방식에서는 과도상태에서의 토크변동을 방지하기 위해 정출력 운전영역에서도 여자분 전류를 운전상태에 관계없이 항상 일정하게 제어하게 되므로, 경부하시 철손 부분이 커지게 되고 전동기의 효율이 저하하여 전기자동차의 일출전 주행거리가 단축되는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 논

문에서는 벡터제어시 철손을 고려한 유도전동기의 등가회로로부터 여자분 전류와 토크분 전류의 비에 따라 임의의 부하에 대하여 효율을 최대로 하는 조건식을 유도하고, 이 조건식을 기본으로 하는 최대 효율제어 기법을 전기자동차에 적용하여 기존의 여자전류 일정제어에 의한 벡터제어 방식과의 특성을 비교하였다. 또한, 차량동력계(Chassis Dynamo)에 의한 시험을 통해 제안된 방식의 성능과 효용성을 검증하였다.

2. 최대 효율 제어

본 연구에서는 최대효율제어를 위해 철손을 고려한 유도전동기의 모델(그림1)을 사용하고 다음의 조건을 가정한다.

- 1) 자기회로의 포화현상, 기계손, 표유부하손 및 온도에 의한 저항변화의 요소들은 고려하지 않는다.
- 2) 시간적 및 공간적 기본파 성분만 고려한다.
- 3) 철손은 자속밀도의 제곱에 비례하고, 주파수의 1.6승에 비례하는 것으로 한다.

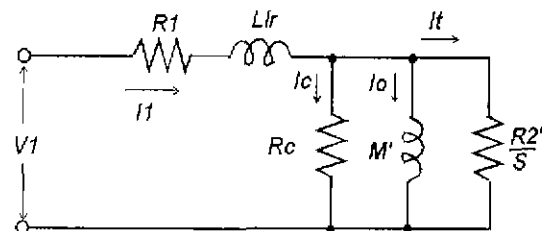


그림 1 벡터제어 유도전동기의 T형 등가회로
Fig. 1 T-type Equivalent Circuit of Vector Controlled Induction Motor

철손분 전류 i_c 와 발생토크 T 는 각각 식(1)과 식(2)와 같이 나타낼 수 있고, 유도전동기의 총 손

실은 고정자와 회전자에 동손 및 철손의 합으로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_c = \frac{\omega L'_m i_{ds}}{R_c} = \frac{R_{ec} i_{ds}}{\omega L_m} \quad (1)$$

$$T = 3pL'_m i_{ds} i_{qs} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} W_{total} &= 3R_s i_s^2 + 3R'_r i_{qs}^2 + 3R_c i_c^2 + W_m \\ &= 3[(R_s R'_r) i_{qs}^2 + (R_s + R'_{ec}) i_{ds}^2 \\ &\quad + 2\left(\frac{R_{ec}}{\omega L_m}\right) R_s i_{ds} i_{qs}] \end{aligned} \quad (3)$$

임의의 부하에 대해 전동기의 효율을 최대로 하기 위해서는 토크분 전류와 여자분 전류의 비를 적절히 결정하여 부하에 따른 최적의 자속을 인가해야 한다. 이를 위한 전류의 비를 $\beta = \frac{i_{qs}}{i_{ds}}$ 라고 하면 식(2)로부터 식(4)와 식(5)를 구해낼 수 있다. 이것을 식(3)에 대입하여 전동기의 손실을 β 의 함수인 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{ds}^2 = \frac{T}{(3pL'_m \beta)} \quad (4)$$

$$i_{qs}^2 = \left(\frac{T}{3pL'_m}\right) \beta \quad (5)$$

$$\begin{aligned} W_{total} &= (R_s + R'_r) \left(\frac{T}{pL'_m}\right) \beta + (R_s + R'_{ec}) \\ &\quad \frac{T}{(pL'_m \beta)} + 2\left[\frac{R_{ec}}{(\omega L_m)}\right] R_s \frac{T}{(pL'_m)} \end{aligned} \quad (6)$$

임의의 부하조건에서 전동기의 최대효율조건은 $\frac{dW_{total}}{d\beta} = 0$ 의 해를 통해 식(7)과 같이 구할 수 있고, 주어진 토크지령 T^* 에 대한 전류 지령치는 식(8)과 식(9)를 통해 구할 수 있다.

$$\beta = \sqrt{\frac{(R_s + R'_{ec})}{(R_s + R'_r)}} \quad (7)$$

$$i_{ds}^* = \sqrt{\frac{T^*}{(3pL'_m \beta)}} \quad (8)$$

$$i_{qs}^* = \frac{T^*}{(3pL'_m i_{ds}^*)} \quad (9)$$

3. 시뮬레이션 및 실험

일정자속에 의한 벡터제어방식과 최대효율제어를 이용한 자속제어 방식의 특성을 시뮬레이션을 통해 비교해보면 그림2, 그림3과 같다. 그림2는 일정자속 제어방식의 전동기 총손실이고, 그림3은 최대효율

제어시의 전동기 총 손실을 나타낸 것으로 일정자속제어가 최대효율제어방식에 비해 정격일때의 손실이 2.5배 이상인 것을 알 수 있다.

그림4와 그림5는 일정자속제어와 최대효율제어방식에서 각각 무부하와 부하시의 전압과 전류의 특성을 나타낸 것이다.

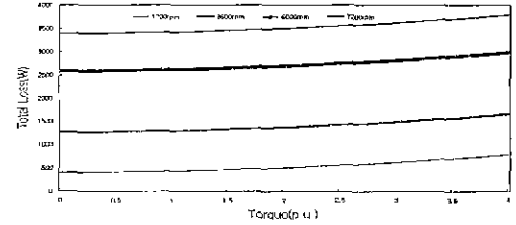


그림 2 일정자속제어 시 전동기 총 손실
Fig. 2 Motor Total Loss of Constant Flux Control

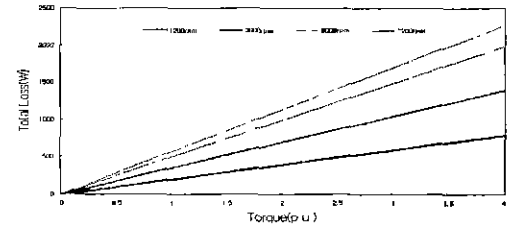


그림 3 최대효율제어 시 전동기 총 손실
Fig. 3 Motor Total Loss of Optimal Flux Control

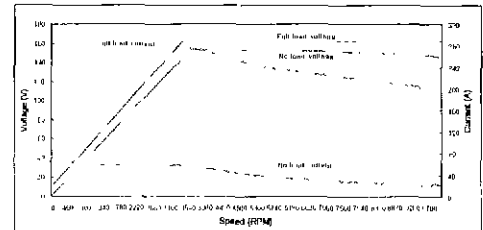


그림 4 일정자속제어의 전압-전류 특성
Fig.4 Voltage-Current Characteristics of Constant Flux Control

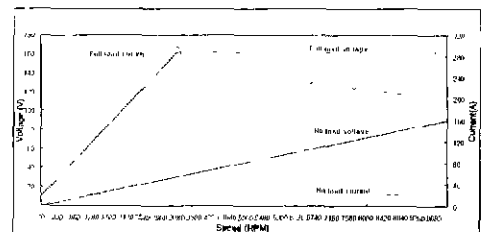


그림 5 최대효율제어의 전압-전류 특성
Fig.5 Voltage-Current Characteristics of Maximizing Efficiency Control

실험은 유도전동기를 탑재한 ASF(aluminum

Space Frame) 자동차와 Chassis Dynamo를 사용하였고, 시험모습이 그림6에 나타나 있다. 또, 그림 7과 그림8에 시험에 사용된 주행패턴인 City Mode와 Highway Mode의 패턴이 소개되어 있다.



그림 6 차량동력계 시험 환경
Fig. 6 Chassis Dynamo Experimental Environment

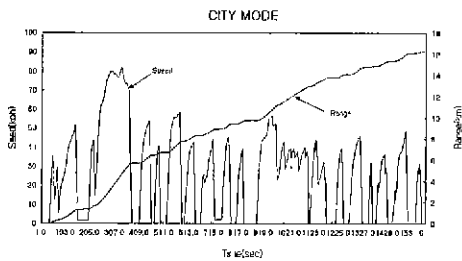


그림 7 시내 주행 모드
Fig. 7 City Mode Pattern

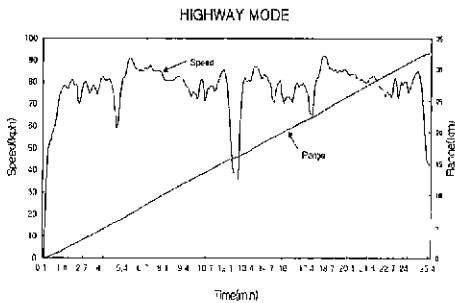
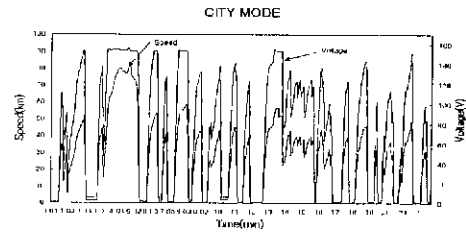
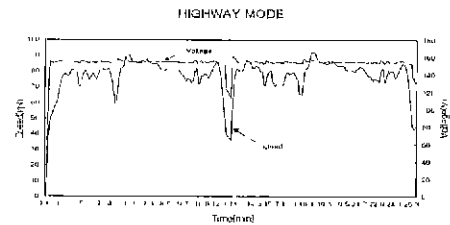


그림 8 고속 주행 모드
Fig. 8 Highway Mode Pattern

그림9는 일정자속제어시의 주행시험결과를 나타내고 그림10은 최대효율제어시의 주행시험결과를 나타낸다. 시험주행 결과 최대효율제어기가 일정자속 제어보다 시내주행모드에서는 약 5%, 고속주행모드에서는 약 10% 정도의 주행거리 증가를 나타내었다.

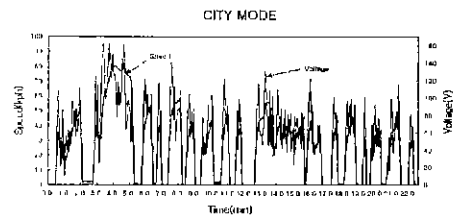


(a) 시내 주행 모드
(a) City Mode

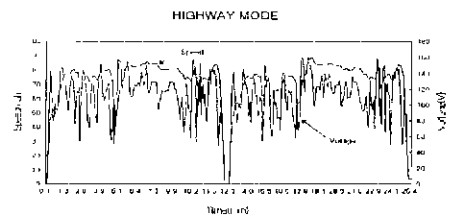


(b) 고속 주행 모드
(b) Highway Mode

그림 9 일정자속제어시 주행시험결과
Fig. 9 Driving Test Results of Constant Flux Control



(a) 시내 주행 모드
(a) City Mode



(b) 고속 주행 모드
(b) Highway Mode

그림 10 최대효율제어시 주행시험결과
Fig. 10 Driving Test Results of Maximizing Efficiency Control

4. 결론

본 연구에서는 유도전동기의 일반적인 벡터제어 방식과 최대효율제어 기법을 전기자동차 구동시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 시험을 통해 비교함으로써 최대효율제어기법의 효용성을 검증하였다. 앞에서 설명한 실험 결과에 따르면, 전기자동차의 주행거리가 일반적인 벡터제어방식 대신 최대효율제어방식을 적용했을 경우에 고속주행모드에서는 약 10%, 시내주행모드에서는 약 5% 정도 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 일충전 주행거리가 중요한 요소인 전기자동차 구동시스템에서는 최대효율제어의 적용이 필요하다고 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] P.L. Jansen, R.D. Lorenz, D.W. Novotny, "Observer-Based Direct Field Orientation : Analysis and Comparison of Alternative Methods", Transaction of IEEE, pp536-543, 1993.
- [2] 최종우, 정대웅, 설승기, "철손을 고려한 유도전동기의 벡터 제어", 전기학회논문지 46권 7호, pp1034-1040, 1997. 7.
- [3] T. Ashigawa, et al., "An efficiency Maximizing Control Method for Induction Motor Used Electric Vehicle Drive", Transactions of I.E.E Japan, Vol. 116-D, No.3 March 1996.
- [4] U.D. Choi, J.R. Kown, J.K. Kim, D.H. Kim, D.H. Lee, "A High Efficiency Drive System for Electric Vehicles", Proceeding of EVS13 Vol.II .pp537-443, 1996.