

전기자동차 구동용 유도전동기의 최대효율제어

김종구, 김명찬, 이종찬
현대중공업 기계전기연구소

Maximizing Efficiency Control of Induction Motor for Electric Vehicle Drive Systems

Jong-Koo Kim, Myung-Chan Kim, Jong-Chan Lee
Hyundai Heavy Industries Electro-Mechanical Research Institute

ABSTRACT

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 simulation.

1. 서론

최근 자동차 배기가스 등으로 인한 대기오염이 날로 심각해지고 있어 점차 세계적으로 지구환경에 심각한 우려를 자아내고 있다. 이에 따라 미국과 유럽은 법제정에 의한 저공해자동차의 보급을 의무화 하고 있기 때문에 전기자동차의 실용화 필요성이 있다.

전기자동차의 실용화를 위해서는 구조가 간단하고 중량과 부피가 작아서 중량 대 출력비가 높은 유도전동기가 주로 연구대상이 되고 있다.

유도전동기에서 만족스러운 정밀도 및 고성능운전 특성을 얻기 위해서는 고정자에 유입되는 순시전류의 크기 및 위상을 토크 및 자속성분으로 분리하여 독립적으로 제어할 수 있는 벡터제어 방식을 이용하는 것이 가장 적합하다.

정상 상태에서는 토크가 자속발생성분인 d축 전류와 토크 발생성분인 q축 전류의 곱에 비례하며, 부하가 요구하는 토크를 발생하기 위한 이들 두 전류의 조합은 무수히 많이 존재한다. 따라서 일정속도에서는 이들 d축 전류와 q축 전류를 항상 전동기 손실이 최소가 되는 조합으로 결정 제어하여 고효율 운전한다.

본 논문에서는 약계자 영역에서 빠른 가감속 성능을 얻기 위한 최대토크 운전 방법을 제시하고, 정격속도 이하에서 최대효율 운전할 수 있는 알고리즘을 적용하여 유도전동기의 고성능 운전을 실현한다.

2. 유도전동기의 직접벡터제어^[2]

유도전동기의 직접벡터제어는 고정자 슬롯에 홀소자나 검색코일 등과 같은 자속센서를 이용하여 자속을 얻는 직접측정법과 전압, 전류와 속도 정보 등을 이용하여 자속을 추정하는 자속추정법이 있으나, 최근에는 그 효율성으로 인해 직접측정법을 이용한 제어법보다는 회전자 자속추정기를 이용한 방식이 많이 사용되고 있다.

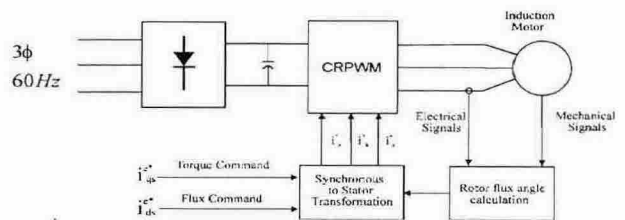


그림1 직접벡터제어 시스템 구성도

Fig.1 System configuration for direct vector control.

동기 자속을 추정하는 방법에는 고정자회로의 전압모델을 이용하는 방법이 있으며 이 방식은 역기전력이 작은 저속영역에서는 고정자 임피던스강하와 잡음의 영향으로 추정 값이 정확하지 않으나, 역기전력이 충분히 큰 고속운전 영역에서는 정확한 자속정보를 제공해 준다. 또한 회전자 회로측의 전류모델을 이용한 방법은 전동기의 운전속도와는 무관하지만 회전자 시정수의 변동에 민감하다.

한편 역기전력이 큰 고속영역에서는 고정자 전압을 적분하여 구한 전압모델이 정확한 자속정보를 제공하고, 역기전력이 작은 저속 영역에서는 회전자 회로를 이용한 전류모델이 전압모델에 비해 더 나은 자속정보를 제공해주므로, 저속에서는 전류

모델을 사용하고 고속에서는 전압모델을 이용하는 페루프 자속 추정기를 사용함으로써 넓은 속도 범위에서의 정확한 회전자 자속을 추정할 수 있다.^[1]

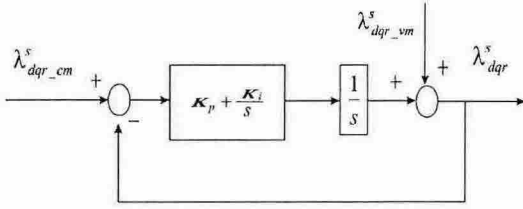


그림 2 전압모델과 전류모델을 함께 사용하는 자속추정기
Fig. 2 Flux estimator with voltage and current model.

그림에서 추정된 자속을 전압모델 및 전류모델로 구해 진 회전자 자속으로 표현하면 다음과 같다.

$$\lambda_r^s = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{rvm}^s + \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{rcm}^s \quad (1)$$

여기서, $K_p = K_1 \frac{L_r}{L_m}$, $K_i = K_2 \frac{L_r}{L_m}$

식 (1)에서 보이듯이 추정된 자속은 저속에서는 전류 모델이 우세하고 고속에서는 전압모델이 우세하며, 전류 모델에서 전압모델로 전이되는 주파수는 PI제어기의 이득으로 결정할 수 있다.

3. 유도전동기의 최대 효율 운전

대부분의 전동기가 정격보다 낮은 경부하에서 운전되고 있어 사실상 전동기는 거의 대부분을 최대효율보다는 낮은 효율로 운전되고 있다. 이와 같이 전동기의 효율이 낮아지는 이유는 경부하에서 회전자의 자속이 필요이상으로 크고 이를 발생시키기 위한 전류가 고정자 및 회전자에서 동손 및 철손을 야기하기 때문이다.

그러므로 부하가 감소하더라도 전동기에 항상 운전조건에 적합한 자속발생전류가 흐르도록 제어할 수 있다면 전동기를 최대효율로 운전할 수 있게 된다.

3.1 최대 효율제어 원리

3.1.1 벡터제어와 유도전동기의 효율

본 연구에서는 철손을 고려한 벡터제어 시 유도전동기의 등가회로부터 여자분 전류와 토크분 전류의 전류비에 의해 임의의 부하에 대해 효율을 최대로 하는 간단한 조건식을 이용하여 최대 효율제어를 구현하였다.

철손을 고려한 유도전동기의 벡터제어 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

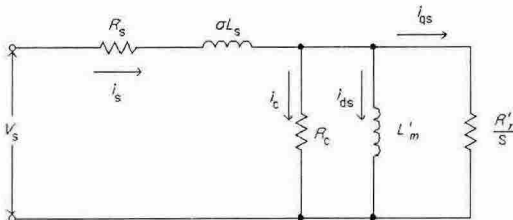


그림 3 벡터제어 유도전동기의 T형 등가회로
Fig. 3 T-type Equivalent Circuit of Vector Controlled Induction Motor

철손을 고려한 벡터제어 시 고정자전류 i_s 와 슬립주파수 ω_s 는 식 (2)와 식 (3)으로 각각 나타낼 수 있다.

$$i_s = \sqrt{(i_{qs} + i_c)^2 + i_{ds}^2} \quad (2)$$

$$\omega_s = \frac{R'_r}{L'_m} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} = \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \quad (3)$$

철손분 전류 i_c 와 발생 토크는 각각 식 (4)와 식 (5)와 같다. 여기서 R_{ec} : 등가 철손저항, $R_c = \alpha \frac{(\omega L_m)^2}{R_{ec}}$, $\alpha = \frac{L_m}{L_r}$

$$i_c = \frac{\omega L'_m i_{ds}}{R_c} = \frac{R_{ec} i_{ds}}{\omega L_m} \quad (4)$$

$$T = 3p L'_m i_{ds} i_{qs} \quad (5)$$

유도전동기의 총 손실은 고정자와 회전자동손, 고정자와 회전자 철손의 합으로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 단, $R_{ec} = k\omega^{1.6}$, $R_{ec}^2 \ll (\omega L_m)^2$ 라고 가정한다.

$$W_{total} = 3R_s i_s^2 + 3R'_r i_{qs}^2 + 3R_c i_c^2 + W_m = 3[(R_s R'_r) i_{qs}^2 + (R_s + R'_{ec}) i_{ds}^2 + 2(\frac{R_{ec}}{\omega L_m}) R_s i_{ds} i_{qs}] \quad (6)$$

여기서 $R'_{ec} = \alpha R_{ec}$, $\alpha L_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$

그림 3의 등가회로에서 임의의 속도와 부하 토크에 대해 전동기의 손실을 쉽게 구할 수 있으며, 전동기의 효율은 (7)식으로 구해진다.

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + W_{total}} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

3.1.2 최대 효율 조건

전동기의 임의의 부하에 대해 효율을 최대로 하는 조건은 토크분 전류와 여자분 전류의 비를 적절히 결정하여 부하에 따른 최적의 자속을 인가하는 것으로 이를 위한 전류의 비를 $\beta = \frac{i_{qs}}{i_{ds}}$ 라고 하면 식 (5)로부터 토크분 전류와 여자분 전류를 구할 수 있다. 이것을 식 (6)에 대입하여, 전동기의 손실을 β 의 함수로 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$W_{total} = (R_s + R'_r) \left(\frac{T}{p L'_m} \right) \beta + (R_s + R'_{ec}) \left(\frac{T}{(p L'_m) \beta} \right) + 2 \left[\frac{R_{ec}}{(\omega L_m)} \right] R_s \frac{T}{(p L'_m)} \quad (8)$$

임의의 부하 조건에서 전동기 효율을 최대화하기 위해서는 운전 중 손실을 최소화해야 하며, 이것을 실현하기 위한 최대효율조건은 $\frac{dW_{total}}{d\beta} = 0$ 의 해를 통해 구해진다. 따라서, 최대효율조건은 식 (9)와 같고,

$$\beta = \sqrt{\frac{(R_s + R'_{ec})}{(R_s + R'_r)}} \quad (9)$$

식 (9)에서 엄밀하게는 ω 및 R_{ec} 도 β 의 함수로 미분의 영향을 받지만, 회전수를 고정한 경우 그 값은 각각 일정하다고 볼 수 있다. 여기서 β 는 동작주파수에 따라 매번 계산할 필요가 있다. 주어진 토오크 지령 T^* 에 대해 각각의 전류 지령치는 식 (10)으로 구해진다.

$$\begin{aligned} i_{ds}^* &= \sqrt{\frac{T^*}{(3pL'_m\beta)}} \\ i_{qs}^* &= \frac{T^*}{(3pL'_m i_{ds}^*)} \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 최대 효율 제어특성 시뮬레이션

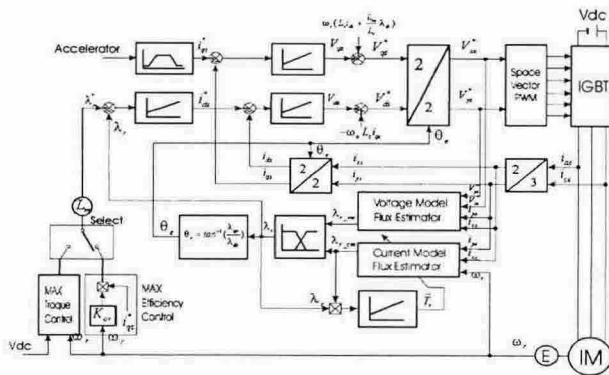


그림 4 최대효율운전을 위한 EV 시스템 블록도
Fig. 4 EV System Block diagram for maximizing Efficiency Control

벡터제어 방식에서 속도제어 시스템에 적용하여 최대 효율제어 시스템을 구현하고자 하면 속도제어 알고리즘에서 d축 기준전류를 설정하는 부분에 설정하면 되며 그림 4와 같다. 또한 그림 5와 6은 회전수에 따른 유도전동기의 효율곡선과 부하율에 따른 유도전동기의 효율운전 특성곡선을 나타낸다.

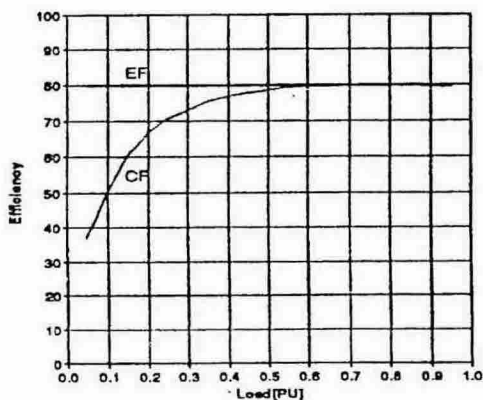


그림 5 속도 1200(rpm)에서 유도전동기의 효율
Fig.5 Efficiency of an induction motor with speed factor

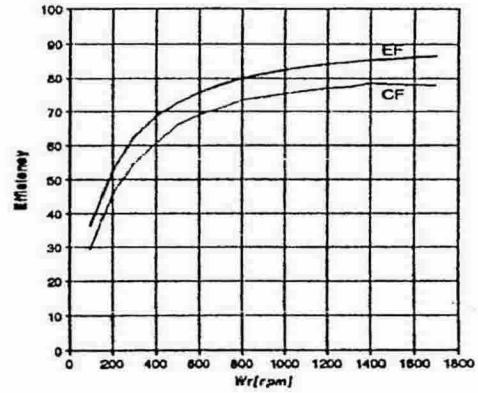


그림 6 부하율 30%에서 유도전동기의 효율
Fig.6 Efficiency of an induction motor with load factor

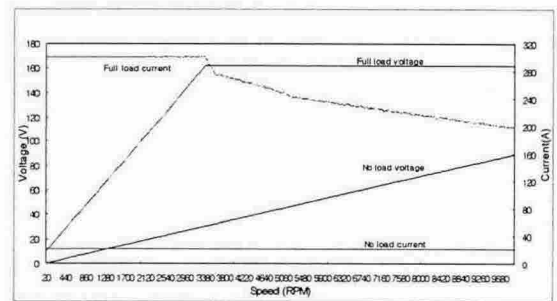


그림 7 최대 효율제어의 전압-전류 특성
Fig.7 V-I Characteristics of Maximizing Efficiency Control

그림 7은 EV용으로 제작된 유도전동기의 최대출력 60kw, 최대토크 160Nm에서 최대 효율제어시 무부하와 부하시의 전압, 전류를 나타낸 특성이다.

4. 결론

전기자동차가 한정된 축전지의 에너지를 이용하여 주행거리를 연장하는 것이 최대의 과제로서, 경량화와 고효율이 필수적이다.

본 논문에서는 유도전동기의 최대효율조건과 시스템구성 및 속도와 부하의 변화에 따른 최대효율운전 방안을 제시하였다. 모의시험결과 정격속도 및 정격부하에서 93%의 효율을 얻을 수 있었으며, 고속운전에서도 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] A.Consoili, W.Cardaci, G.Scarcella, A.Testa "Efficiency Optimization Techniques in Induction Motor Drives for Electric Vehicles Application", P roceeding of EVS15, 1998.