

전기자동차 구동용 유도전동기 시스템의 고효율 운전

유상규 · 윤덕용** · 홍순찬* · 최옥돈*** · 김종구***
*단국대학교 전기공학과 **천안공업전문대학 제어계측과 ***현대중공업(주) 중앙연구소

High Efficiency Drive of Induction Motor Systems for Electric Vehicles

Sang-Gyu Yoo · Duck-Yong Yoon** · Soon-Chan Hong* · Uk-Don Choi*** · Jong-Koo Kim***
*Dankook University **Cheonan Tech. Junior College ***Hyundai Heavy Industry Co., Ltd.

Abstract - This paper deals with the high efficiency drive of a vector controlled inverter fed induction motor system for electric vehicles. The loss equation is derived from the voltage equations in synchronously rotating reference frame. The ratio of the d-axis and q-axis component currents should be maintained constant to maximize the efficiency at a specified speed. Digital simulations are carried out and the results are compared with those of the conventional constant flux control.

1. 서 론

최근에 환경문제에 대한 관심이 높아짐에 따라 유해 배기가스를 배출하는 디젤식 또는 가솔린식 자동차를 대체할 전기자동차에 대한 개발의 중요성이 증대되고 있다. 전기자동차는 무공해라는 측면과 함께 에너지 효율면에서도 가솔린 자동차보다 약 10% 이상 높은 것으로 알려져 있다.^[1] 전기자동차는 충전식 전지를 사용해야 하므로 사용 가능한 에너지가 한정되어 있어서 주행거리나 시간이 제한될 수 밖에 없다. 이런 이유로 높은 에너지밀도를 갖는 고성능 축전지 개발은 물론, 축전지의 한정된 에너지를 가장 효율적으로 이용하는 기술이 필요하다.

유도전동기의 손실은 회전자 동손, 고정자 동손, 철손, 포유부손, 마찰손과 풍손 등으로 분류할 수 있다.^{[2][3]} 이중 전기적으로 제어가 가능한 손실은 고정자 및 회전자의 동손과 철손으로 전체 손실의 약 90% 이상을 차지한다.

본 연구에서는 에너지를 효율적으로 이용하기 위하여 전기자동차의 엔진에 해당하는 전동기 구동 시스템의 고효율화를 도모한다. 대상 전동기로는 구조가 견고하고 중량대 출력비가 높은 농형유도전동기이며 동손과 철손을 전기적으로 제어하여 전동기의 손실을 줄여 효율을 향상시키는 데 목적이 있다. 먼저 유도전동기를 d-q 동기좌표계로 변환하고 정상상태에서의 손실식을 구한 다음에 손실이 최소가 되는 조건을 기본으로 하여 시뮬레이션 한다.

2. 유도전동기의 벡터제어 및 효율해석

유도전동기의 최대효율은 동손과 철손이 일치할 때 얻어지는 것이며^[2] 이것은 유도전동기의 쇄교자속을 제어함으로써 가능하다. 쇄교자속을 제어하는 것은 자속발생 전류성분 i_{ds} 를 조정하면서 제어를 실행할 수 있다. 정상상태에서는 토크가 d축 전류와 q축 전류의 곱에 비례하므로 일정속도에서는 d축 전류와 q축 전류를 항상 전동기의 손실이 최소가 되는 비율로 제어함으로써 고효율 운전이 가능하다.

2.1 벡터제어시의 토크와 슬립각주파수

유도전동기의 동기회전좌표계에서의 전압방정식은 아래와 같다.^[4]

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + p \lambda_{dr} - \omega_{sl} \lambda_{qr} = 0 \quad (3)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + p \lambda_{qr} + \omega_{sl} \lambda_{dr} = 0 \quad (4)$$

단, $p=d/dt$ 이고 ω_{sl} 은 $\omega_e - \omega_r$ 이다. 쇄교자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} = L_s i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (5)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} = L_s i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (6)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} = L_r i_{dr} + L_m (i_{dr} + i_{ds}) \quad (7)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qr} + i_{qs}) \quad (8)$$

여기서 방정식을 간단히하기 위해 동기회전좌표계에서 회전자의 쇄교자속의 방향을 그림 1처럼 d축에 일치시킨다면^[5] 회전자 쇄교자속의 q축성분인 i_{qr} 은 0이 된다. 그리

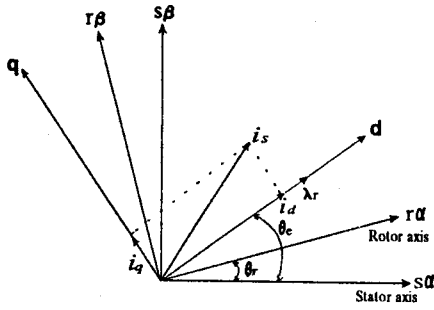


그림 1. 회전자 쇄교자속 벡터도

고, 누설인덕턴스에서의 자속은 자화자속에 비해 아주 작으므로 누설인덕턴스 L_{sl} , L_{rl} 을 무시하면 식(6), (8)에서 다음 식들을 얻을 수 있다.

$$\lambda_{qr} = L_m(i_{qs} + i_{qr}) = 0 \quad (9)$$

$$\lambda_{qs} = L_m(i_{qs} + i_{qr}) = 0 \quad (10)$$

식(9)로부터

$$i_{qs} = -i_{qr} \quad (11)$$

정상상태일 때 λ_{dr} 의 전류성분들은 직류분이기 때문에 식(3)에서 $p\lambda_{dr}$ 은 0이 되며 식(9)를 고려하면

$$i_{dr} = 0 \quad (12)$$

이다. 또한, L_{sl} , L_{rl} 이 무시되므로 식(5), (7)에서

$$\lambda_{ds} = \lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (13)$$

따라서 유도전동기의 극수를 P 라 하면 토크식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} T_e &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\ &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_m i_{ds} i_{qs} \end{aligned} \quad (14)$$

그리고, 슬립라주파수 ω_{sl} 은 $p\lambda_{dr} = 0$ 이므로 식(11), (13)을 식(4)에 대입하면 다음과 같다.

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r = \frac{R_r}{L_m} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \quad (15)$$

2.2 유도전동기의 손실 및 효율 특성

일반적으로 전동기 시스템에서 전기적 시정수는 기계적 시정수 보다 상당히 짧기 때문에^[2] 손실해석은 정상상태인 유도전동기를 대상으로 한다.

① 고정자 동손 P_{cs}

$$P_{cs} = R_s i_{ds}^2 + R_s i_{qs}^2 \quad (16)$$

② 회전자 동손 P_{cr} ($i_{dr} = 0$)

$$P_{cr} = R_r i_{qr}^2 = R_r i_{qs}^2 \quad (17)$$

③ 철손 P_i

유도전동기의 철손은 히스테리시스손(hysteresis loss)과 와전류손(eddy current loss)으로 구성되며 고정자와 회전자의 철손은 다음과 같다.^[6]

$$P_{is} = K_h \omega_s \lambda_s^2 + K_e \omega_s^2 \lambda_s^2 \quad (18)$$

$$P_{ir} = K'_h \omega_{sl} \lambda_r^2 + K'_e \omega_{sl}^2 \lambda_r^2 \quad (19)$$

여기서 λ_s 와 λ_r 은 고정자와 회전자의 합성쇄교자속이다. 위식에서 회전자의 철손은 전동기가 정상상태일 때 $\omega_{sl} \ll \omega_s$ 이므로 무시할 수 있다.^[6] 그리고, λ_s 에서 λ_{qs} 는 식(10)과 같이 0이 되기 때문에 λ_{ds} 만 남게 되므로 철손은 아래식과 같이 정리할 수 있다.

$$P_i = K_h \omega_s \lambda_{ds}^2 + K_e \omega_s^2 \lambda_{ds}^2 \quad (20)$$

④ 총손실

유도전동기의 총손실은 식(13)을 고려하면

$$\begin{aligned} P_i &= P_{cs} + P_{cr} + P_i \\ &= (R_s + K_h \omega_s L_m^2 + K_e \omega_s^2 L_m^2) i_{ds}^2 + (R_r + R_s) i_{qs}^2 \end{aligned} \quad (21)$$

이고 식(15)를 이용하여 ω_{sl} 의 함수로 표현하면 다음과 같은 손실식을 얻을 수 있다.

$$P_i = C_1 i_{ds}^2 + C_2 i_{qs}^2 + C_3 i_{ds} i_{qs} \quad (22)$$

여기서 계수에 해당하는 부분들은 다음과 같다.

$$C_1 = R_s + K_h \omega_s L_m^2 + K_e \omega_s^2 L_m^2 \quad (23)$$

$$C_2 = R_r + R_s + K_e R_r^2 \quad (24)$$

$$C_3 = K_h L_m R_r + 2K_e \omega_s L_m R_r \quad (25)$$

식(14)에서 i_{qs} 를 구하여 식(22)에 대입하면 P_i 는 i_{ds} 만의 함수로 된다. 이 수식을 i_{ds} 로 미분한 값이 0이 될 때 손실이 최소가 되는데 이와 같이 계산된 결과를 i_{qs} 와 i_{ds} 로 관계로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$C_1 i_{ds}^2 = C_2 i_{qs}^2 \quad (26)$$

식(26)의 관계를 만족할 때 손실이 최소가 되며 효율이 최대가 된다. 따라서 고효율 운전을 위한 d, q 축 전류의 관계는 아래와 같다.

$$i_{ds, opt.} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} i_{qs, opt.} = K_{opt.} i_{qs, opt.} \quad (27)$$

여기서 $K_{opt.}$ 은 전동기의 효율을 최적화하는 최적전류비이다. 따라서 i_{ds} 의 값을 i_{qs} 에 최적전류비 $K_{opt.}$ 을 곱한 값으로 유지시키면 전동기의 손실은 최소가 되고, 전동기는 고효율 운전이 가능하게 된다.

전동기의 효율은

$$\eta = \frac{T_e \cdot \omega_m}{T_e \cdot \omega_m + P_i} \quad (28)$$

인데

$$\omega_m = (2/P) \cdot \omega_r \quad (29)$$

의 관계와 식(14), (22), (27)을 이용하면 최적효율 $\eta_{opt.}$ 는 다음과 같다. 단, $C_4 = (3/2)L_m$ 이다.

$$\eta_{opt.} = \frac{C_4 \cdot K_{opt.} \cdot \omega_r}{C_4 \cdot K_{opt.} \cdot \omega_r + 2C_2 + C_3 \cdot K_{opt.}} \quad (30)$$

3. 고효율 운전 시스템의 구성

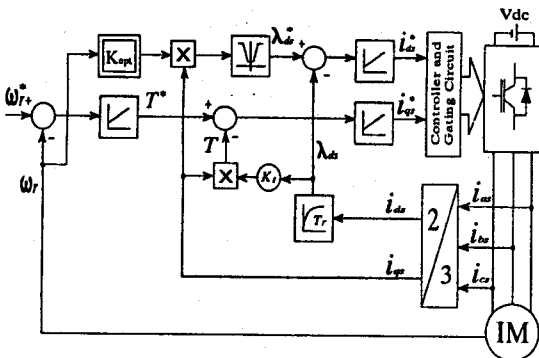


그림 2. 유도전동기 고효율 운전 시스템

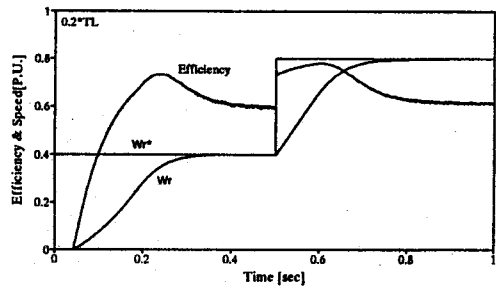
그림 2는 유도전동기의 고효율 운전 시스템의 전체 블록도이다. 먼저 전동기의 속도를 검출하여 기준토크를 만들어 주는 속도제어루프를 설치하고, 여기서 얻은 기준토크와 실제 토크의 오차를 제어하여 토크분 전류 i_{qs} 를 만들어 주는 토크전류 제어루프를 설치한다. 또한, 유도전동기의 고효율 운전을 위하여 i_{ds} 와 i_{qs} 가 최적전류비의 관계를 갖도록 하는 제어루프를 설치한다. 각 제어기는 PI제어기를 사용하며 전류치에 대해서는 제한을 둔다.

4. 시뮬레이션

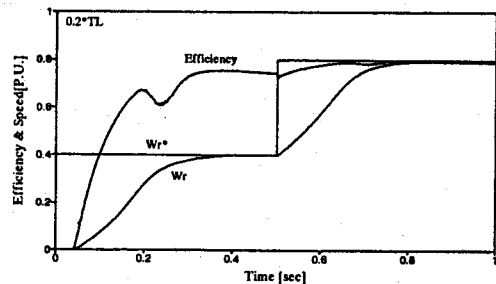
사용된 전동기는 3상 4극 3마력의 유도전동기로서 정격 사양은 전압 220[V], 주파수 60[Hz]이다. 전동기 상수는 고정자저항 $R_s=0.6865[\text{ohm}]$, 회전자저항 $R_r=0.6865[\text{ohm}]$ 이고 자화 인덕턴스 $L_m=81.36[\text{mH}]$ 이다. 시뮬레이션은 일정자속(Constant Flux)운전시와 고효율 운전시의 결과를 비교하여 살펴보았다.

그림 3은 20%의 부하가 걸린 상태에서 정격속도의 40%로 기동하여 0.5초에 다시 정격속도의 80%로 가속한 경우의 효율을 나타낸다. 그림 3의 (a), (b)를 비교하여 보면 과도상태에서는 일정자속 운전의 경우가 고효율 운전의 경우보다 효율이 높지만 속도가 안정상태로 도달하면 고효율 운전을 한 경우가 효율이 더 높으면서도 속도응답이 뒤지지 않음을 알 수 있다.

그림 4는 일정속도일 때 부하율에 따른 효율 비교곡선이다. 그림에서 EF는 고효율 운전의 경우이고 CF는 일정자속운전의 경우이며 이 두방법 사이의 효율의 차이는



(a) 일정자속 운전



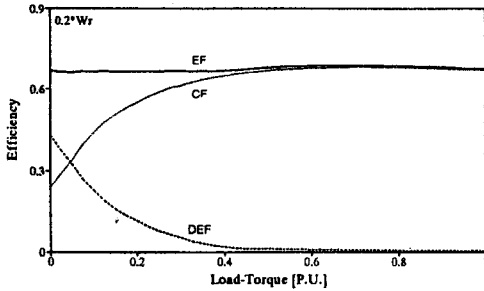
(b) 고효율 운전

그림 3. 속도응답 특성과 효율(부하율:20%)

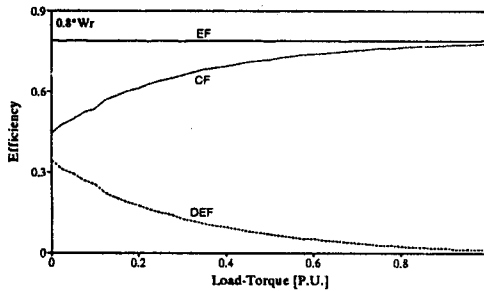
DEF로 나타내었다. 그림으로 부터 고효율 운전시의 효율은 부하율에 큰 변화가 없으며 일정자속 운전에 비해 경

부하일수록 더 효율이 높음을 알 수 있다.

그림 5는 일정부하일 때 속도에 따른 효율의 변화이다. 그림 5를 보면 정격속도에 가까워질수록 효율이 높아지며, 경부하일 때보다 중부하일 때 효율의 차이가 적음을 알 수 있다.

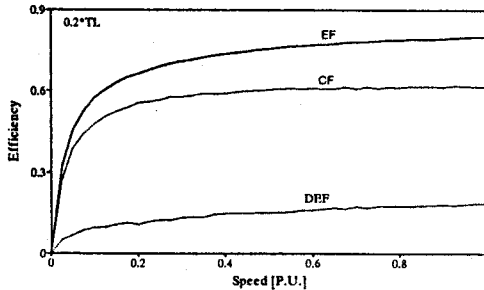


(a) 정격속도의 20% 운전

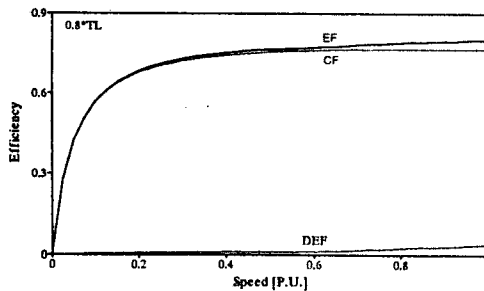


(b) 정격속도의 80% 운전

그림 4. 부하율에 따른 효율비교(일정 속도)



(a) 정격부하의 20%



(b) 정격부하의 80%

그림 5. 속도에 따른 효율비교(일정 부하율)

5. 결론

본 논문에서는 전기자동차 구동용 농형 유도전동기의 벡터제어형 고효율 운전제어 시스템에 대하여 연구하였다. 벡터제어를 적용하기 위하여 동기회전좌표계($d-q$ 좌표계)에서의 유도전동기 전압방정식으로부터 전기적으로 제어가 가능한 손실식을 구하고 자속발생 전류성분(i_{ds})과 토크발생 전류성분(i_{qs})의 최적비를 구하였다. 이 식을 기본으로 하여 유도전동기의 효율개선에 대한 시뮬레이션을 하였으며 일정자속 제어방법을 사용한 전동기의 효율과 제한된 제어방법을 사용한 전동기에 효율의 차이를 비교, 검토하였다. 시뮬레이션 결과 고효율 운전시에 효율은 부하의 변화 보다 속도의 변화에 효율변화가 크며, 일정자속 제어방식 보다 경부하일수록 효율이 높으며 속도응답 특성도 뒤지지 않음을 알 수 있었다.

앞으로 실제 전기자동차에 탑재 가능한 용량의 고속 유도전동기에 대한 실험과 전동기 상수 변화에 대한 연구 및 On-Line제어를 통한 전체 시스템의 최적화가 이루어져야 한다.

본 연구는 통상산업부에서 시행한 G7과제(차세대 자동차기술)개발사업의 기술개발 결과임.

참고문헌

- [1] M.J. Riezenman, "Electric Vehicles", Special Report, IEEE Spectrum, November, 1992.
- [2] G.O. Garcia, J.C. Mendos Luis, and R.M. Stephan, "Fast Efficiency Maximizer for Adjustable Speed Induction Motor Drives", IECON Proc., 1992.
- [3] G.R. Slemon, "Electric Machines and Drives", Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [4] B.K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, 1986.
- [5] D.S. Kirshen, D.W. Novotny, and T.A. Lipo, "On-Line Efficiency Optimization of a Variable Frequency Induction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Appl., May/June, 1985.
- [6] P. Vas, "Electrical Machines and Drives", Oxford Science Publication, 1992.