

최적 자속 제어를 이용한 유도전동기의 벡터 제어형 고효율 속도 제어

주 형 길^o, 김 경화, 정 세교, 홍 찬호, 배 정도, 윤 명중
한국과학기술원 전기및전자공학과

High Efficiency Vector Control of Induction Motor Using Optimal Flux Control

Hyeong-Gil Joo, Kyeong-Hwa Kim, Se-Kyo Chung, Chan-Ho Hong,
Jung-Do Bae, and Myung-Joong Youn
Department of Electrical Engineering
Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: The efficiency optimized speed control system of Induction Motor is proposed. At light load, the IM has poor efficiency because of relatively high magnetizing current. In this paper, by employing the field oriented control with flux controller which the motor is operated at optimal slip frequency, the proposed system has good performance and high efficiency. In simulation, the performance, loss and efficiency of the proposed optimal flux control system are compared with those of the conventional constant flux operation. In conclusion, the efficiency is raised by 2.55%, the loss is decreased by 0.1 [p.u].

효율을 향상 시키는 자속 제어형 방식이 대두되기 시작했다. 이에 대한 연구로는 부하량에 따른 최적 전압/주파수비 제어[4], 고정자 전압 및 주파수 제어 방식 등이 있으나 이러한 방법 등은 동특성의 저하라는 단점을 갖는다. 주므로 본 논문에서는 벡터 제어 방식에 따른 최적 효율 조건에서의 운전을 통해 동특성과 효율면에서 뛰어난 제어를 개발하였다.

1. 서론

최근 들어 전력 증가에 따른 에너지 수급난의 어려움을 겪으면서 전력기기에 대한 효율 관리가 강화되어 가고 있다. 특히 유도전동기의 경우 산업에너지의 60% 이상을 차지하는 광범위한 동력원으로서 이에 따른 고효율 유도 전동기 및 제어 시스템의 개발에 대한 관심이 높아져 가고 있는 추세이다. 1977년 미국의 F.J.Nola는 경부하 운전시 유도전동기의 효율이 저감되는 것을 전압을 감소시켜 역률을 개선함으로써 효율을 증가시킨 역률 제어기(PFC)에 의한 전력 절감 방식을 제시하였다.[1] 이후 Mohan[2], Rowan[3]에 의해 SCR에 의한 전압 제어를 통하여 효율향상을 꾀한 연구가 있었으나 속도 제어 범위의 한계성과 고조파에 따른 손실 증가로 큰 주목은 받지 못했다. 그후 전력 전자기술의 발달에 따른 주파수 제어 기술의 개발로 가변전압 가변주파수 제어 방식에 따른 효율 제어 기술에 대한 연구가 진행되었다. 기존의 동특성 향상을 위한 속도 제어는 일정 전압/주파수 운전에 따른 정자속 제어가 일반화되어 왔으나 경부하시 부하 전류의 감소에 비해 여자전류는 일정하게 되어 역률 및 효율이 나빠지게 되는 단점을 갖고 있다. 이에 부하에 따라 자속의 크기를 변화시킴으로써 여자전류의 크기를 제어하여 역률 및

2. 고효율 운전과 벡터 제어 방식

유도전동기를 모델링하고 모델링식으로 부터 고효율 운전 조건을 구하도록 하겠다. 먼저 제어의 용이성을 위하여 기준좌표계를 회전자 자속과 일치하는 회전자 자속 동기 좌표계로 잡으면 회전자 자속은 $\lambda_{qr} = 0$, $\lambda_{dr} = \lambda_r$ 이 되어 고정자 전류 및 부하를 입력으로 하고 회전자 자속 및 속도를 상태 변수로 하여 식을 유도하면 다음과 같이 된다. 그러므로 기존의 5차의 시스템 방정식은 2차로 줄게 되어 제어 특성이 좋아지게 된다.

$$0 = \lambda_r + \frac{1}{\tau} \lambda_r - \frac{1}{\tau} L_{mids} \quad (1)$$

$$\omega_{sl} = \frac{1}{\tau} L_{mids} \frac{1}{\lambda_r} \quad (2)$$

$$0 = 2H_c \omega_r + 2H_a \omega_r + T_l - T_e \quad (3)$$

$$H_c = \frac{J}{p}, H_d = \frac{B}{p}, \tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{L_r} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{qs} \quad (5)$$

이때 유도 전동기의 등가회로는 그림1과 같이 된다. 한편 효율은 출력 대 입력의 비로 표시할 수 있으므로 등가회로로 부터 출력과 손실을 구하여 효율을 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\text{출력 } P_{out} = \omega_r T_e \quad (6)$$

$$\text{손실 } P_{loss} = i_s^2 R_s + i_{qs}^2 R_r \quad (7)$$

$$\text{효율 } \eta = P_{out} / (P_{out} + P_{loss}) \quad (8)$$

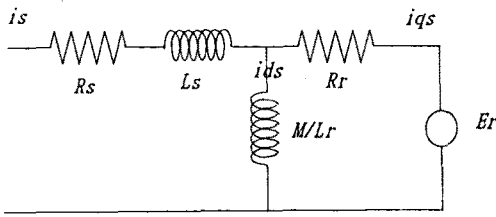


그림 1 유도 전동기 등가회로

정상 상태에서 효율이 최대가 될 조건을 구하기 위하여 주어진 속도, 부하에서의 효율을 슬립 주파수로 미분하여 0이 되는 점을 구하면 다음과 같이 된다. 이때 철손 저항은 무시한다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial \omega_{sl}} = 0 \quad (9)$$

식(2)로 부터 슬립 주파수 ω_{sl} 은 다음과 같이 되고 λ 은 정상 상태에서 $Lm i_{ds}$ 과 같으므로

$$\begin{aligned} \omega_{sl} &= \frac{1}{\tau} Lm i_{ds} \frac{1}{\lambda} \\ &= \frac{R_r I_{qr}}{L_r I_{ds}} \end{aligned} \quad (10)$$

가 되어 효율은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{i_{qs}^2 \left(\frac{Lm}{Lr}\right)^2 \frac{(1-s)R_r}{s}}{i_{qs}^2 \left(\frac{Lm}{Lr}\right)^2 R_r + i_{qs}^2 R_s} = \frac{i_{qs}^2 \left(\frac{Lm}{Lr}\right)^2 (1-s)R_r}{i_{qs}^2 \left(\frac{Lm}{Lr}\right)^2 R_r + [1 + \left(\frac{1}{\tau \omega_{sl}}\right)^2] R_s} \\ &= \frac{\left(\frac{Lm}{Lr}\right)^2 (1-s)R_r}{\left(\frac{Lm}{Lr}\right)^2 R_r + [1 + \left(\frac{1}{\tau \omega_{sl}}\right)^2] R_s} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\omega_e = \omega_{sl} + \omega_r, d\omega_e = d\omega_{sl} \quad (12)$$

$$\omega_{sl, opt} = R_r / \sqrt{L_m^2 \frac{R_r}{R_s} + L_r^2} \quad (13)$$

그러므로 유도 전동기가 최적 효율에서 운전되기 위해서는 식(13)과 같은 슬립 주파수로 동작이 되어야 한다.

3. 고효율 운전 제어 시스템 구성

그림 2에 유도 전동기의 고효율 운전 제어 시스템의 전체 블록도가 있다. 제어기는 속도 제어기와 토오크 제어기, 자속 제어기 3개의 제어기로 구성되어 있다. 전동기의 속도 신호를 검출하여 토오크 기준 신호를 만들어 주는 속도 제어루프가 있고, 여기서 얻은 토오크 기준 신호와 실제 토오크의 오차를 제어하여 토오크분 전류 I_{qs} 를 만들어 주는 토오크 전류 제어 루프가 있다.

한편 최적 효율 운전 하에서 운전이 이루어 지도록 주어진 토오크 입력 전류에 대해서 자속을 발생시키도록 하는 기준 자속 발생기와 이 자속을 추종하도록 하는 자속 제어 루프가 있다. 각 제어기는 PI제어기를 사용하였는데, 전류치에 대해서는 제한을 두었다.

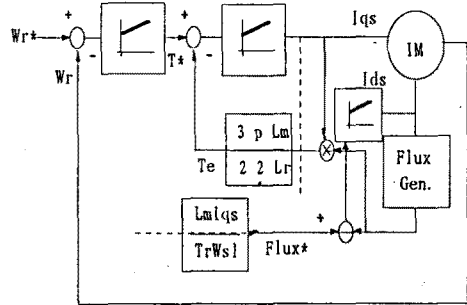


그림 2 고효율 제어 시스템

4. 컴퓨터 모의 실험

4.1 전동기 사양 및 제정수

컴퓨터 모의 실험에 사용된 전동기는 다음과 같다. 3상 4극 3마력의 유도전동기로서 정격 사양은 전압220V, 주파수60Hz이고, 전동기 상수는 고정자 저항 0.687[ohm], 회전자 저항은 0.842[ohm], 고정자 누설 인덕턴스는 2.61[mH], 회전자 누설 인덕턴스는 3.92[mH], 자화 인덕턴스는 81.36[mH] 이다.

제어기의 제어 이득은 속도 제어기의 오차가 0.15[pu] 이내에 들어서기까지는 $K_p=50$ 의 비례 제어기만 작동하도록 하고, 오차가 1.5[pu]이내에 들면 $K_i=20$ 인 적분제어도 같이 동작하도록 하여 오버슈트 및 정상상태 오차를 최대한 줄이도록 하였다. 토오크 제어기는 $K_p=7, K_i=3$ 으로 하고 자속제어기의 경우는 $K_i=0.7, K_p=0.5$ 로 하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 부하 1.0[pu], 0.2[pu]의 경우에 대해서 속도 응답과 효율, 손실을 살펴보았다. 실선은 최적 효율 운전 곡선이고, 점선은 일정자속 운전 시의 곡선을 나타낸다. 그림 3은 속도 응답이고, 그림 4는 효율 곡선, 그림 5는 손실 곡선을 나타내고 있다. 시뮬레이션에서 보는 바와 같이 부하가 전부하에서는 효율의 향상이 크게 두드러지지 않고 있으나 손실 곡선을 보면 0.1[pu] 정도의 손실이 저감됨을 알 수 있다. 한편 속도 응답 곡선은 약간 떨어 짐을 알 수 있다. 그러나 기준 속도 도달 시간은 거의 일치하고 있다. 부하가 0.2[pu]인 경우에는 전부하에서의 경우 보다 속도 응답성도 좋아 졌고, 효율, 손실 모두 좋아졌음을 알 수 있었다. 특히 효율의 경우 87.14%에서 89.69%로 2.55% 정도가 증가 하였다. 이러한 현상은 자속밀도가 높은

철기제일 경우 더 크게 나타날 것이라고 예측된다.
이상을 정리해 보면 다음 표와 같다.

		최적 효율 제어		일정 자속 제어	
부하	0.2	1.0	0.2	1.0	
효율	89.69	91.89	87.14	91.88	
손실	0.1562	0.3318	0.2660	0.4787	
전류	0.7153	1.39	0.7758	1.39	
자속	0.8394	0.99	1.0	1.0	

표1 일정자속 제어와 최적 효율제어의 성능 비교

5. 결론

이상으로 본 논문에서는 최적 효율하에서 운전이 되도록 자속의 크기를 제어하는 유도 전동기의 벡터 제어형 최적 효율 속도 제어 시스템에 대하여 살펴 보았다. 결론적으로 경부하시(0.2pu) 일정 자속 제어 방식의 경우 보다 2.55%의 효율 향상을 갖고 왔으며 그에 따른 전류의 크기도 감소했음을 알 수 있었다. 또한 일정 속도까지의 손실 발생이 제안된 시스템의 경우 더 적게 되었다.(1[pu]시 0.1, 0.2[pu]시 0.11) 그러므로 제안된 시스템은 과도 상태에서도 저전력의 손실을 발생하도록 작용하고 있음이 입증되었다. 앞으로 수행해야 할 후속과제로는 전동기 상수 변화에 대한 고려 및 on-line제어를 통한 전체 시스템의 최적화 설계가 이루어져야 할 것이다.

References

- [1] F.J.Nola, "Power factor control systems for ac induction motor", U.S. Patent 4 052 648, Oct.4,1977
- [2] N.Mohan, "Improvement in Energy Efficiency of Induction Motor by Means of Voltage Control", IEEE Trans. PAS-99, No.4, pp.1466-1471. July/Aug. 1980.
- [3] T.M.Rowan and T.A.Lipo, "A quantitative analysis of induction motor performance improvement by SCR voltage control," IEEE. Trans. IA-19, 1983.
- [4] T.Ohnishi, H.Miyazaki, and H. Okitsu, " High Efficiency Drive of an Induction Motor by Means of V/f Ration Control," IECON'88, p.p.780-785
- [5] A.Kusko and D.Galler, "Control Means for minimization of losses in ac and dc motor drives," IEEE Trans. IA-19, p.p.561-570,1983
- [6] D.S.Kirschen, D.W.Novotny, and W.Suwanwisoot, "Minimizing Induction Motor Losses by Excitation Control in Variable Frequency Drives," IEEE Trans. IA-20, No.5,Sept./Oct. ,p.p.1244-1250

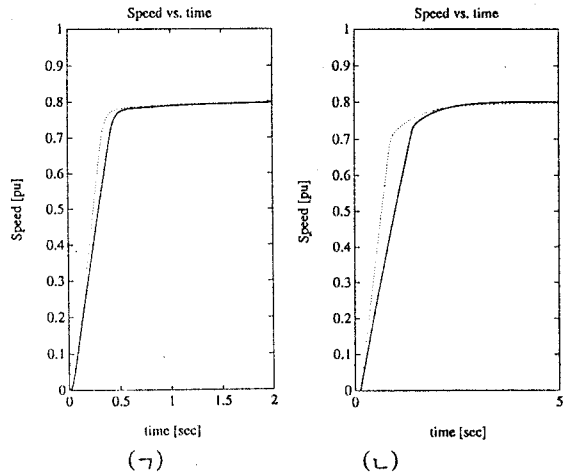


그림3 속도 응답 특성 (A) 부하 0.2[pu] (B) 부하 1.0[pu]

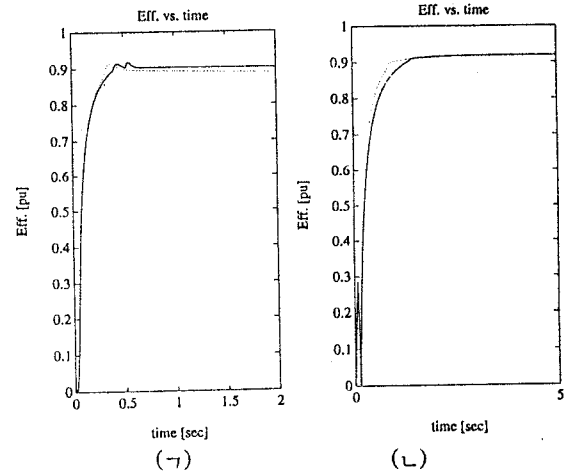


그림4 효율 곡선 (A) 부하 0.2[pu] (B) 부하 1.0[pu]

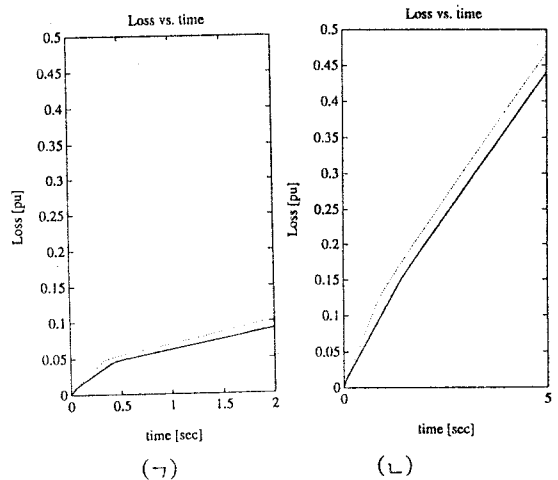


그림5 손실 곡선 (A) 부하 0.2[pu] (B) 부하 1.0[pu]