

유도전동기의 신속한 최대효율제어

(Fast Maximum Efficiency Control of Vector-Controlled Induction Motor Drives)

신명호*

(Myoung-Ho Shin)

요 약

속도와 토크의 값이 다른 5개의 동작점에서 효율이 최대가 되는 자속을 구한 후, 5개의 자속을 이용하여 효율이 최대가 되는 자속의 곡면을 구한다. 주어진 속도와 토크를 이용하여 자속곡면에서 효율이 최대가 되는 자속을 구한 후, 이 자속을 초기값으로 하여 미리 정해진 양만큼 자속을 변화시키면서 최대효율제어를 수행한다. 시뮬레이션 결과 제안한 방법에 의하여 신속히 최대효율제어를 위한 자속으로 수렴함을 보인다.

Abstract

Magnetic fluxes for maximum efficiency are calculated at five operating points as speed and torque are varied. The surface of magnetic flux for maximum efficiency is calculated by using the five points. Then, maximum efficiency control is fulfilled with the magnetic flux calculated from the surface of magnetic flux at a given speed and torque. Simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Induction Motor, Fast Maximum Efficiency Control, Fast Convergence, Stator-Flux-Oriented

1. 서 론

전기에너지의 50[%] 이상을 전동기가 소비하고 있으며, 이 중 거의 대부분을 유도전동기가 소비하고 있음에 따라 유도전동기의 효율을 최대로 하고자 하는 연구가 진행되어 왔다[1-7].

전동기의 입력을 측정하고 미리 정해진 양 만큼씩 자속을 변화시키면서 입력이 최소가 되는 자속을 찾

는 방법은 전동기의 파라미터를 몰라도 되며 파라미터의 변화와 무관한 장점을 가지고 있는 반면에 최대효율을 위한 자속으로의 수렴시간이 큰 단점이 존재한다[2-4].

참고문헌 [6]은 고정자자속기준제어의 최대효율 제어에 관한 논문으로서 자속을 미리 정해진 양 만큼씩 변화시키면서 최대효율제어를 위한 자속을 찾는 방법을 구현하였으나 최대효율제어를 위한 자속으로의 수렴시간이 큰 단점이 존재한다.

참고문헌 [3]에서 저자는 최대효율제어를 위한 자속을 찾기 위하여 Golden Section 방법을 사용하여 신속한 최대효율제어의 효과를 얻었다. 또한 참고문헌 [7]은 최대효율제어의 수렴시간을 단축시키기 위

* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-970-6408, Fax : 02-978-2754

E-mail : mhshin@snut.ac.kr

접수일자 : 2009년 2월 19일

1차심사 : 2009년 2월 26일

심사완료 : 2009년 5월 15일

한 연구로서 2차보간법을 이용하여 입력이 최소가 되는 자속을 찾고, 이 값을 초기값으로 하여 최대효율제어를 수행하여 수렴시간을 단축하는 효과를 얻었다.

본 논문에서는 [6]의 단점을 개선하기 위하여 [3,7]과는 다른 또 하나의 방법을 제안한다. 속도와 토크의 값이 다른 5가지의 동작점에서 효율이 최대가 되는 자속을 구한 후 5개의 자속을 이용하여 효율이 최대가 되는 자속의 곡면을 구한다. 주어진 속도와 토크에 대응하는 곡면에서의 효율이 최대가 되는 자속을 구한 후, 이 자속을 초기값으로 하여 미리 정해진 양만큼 자속을 변화시키면서 최대효율제어를 수행한다. 시뮬레이션 결과 제안한 방법에 의하여 신속히 최대효율제어를 위한 자속으로 수렴함을 보인다.

2. 고정자자속기준제어

그림 1은 최대효율제어를 위한 고정자자속기준제어 블록도를 나타내고 있다. 첨자 *는 변수의 지령치를, 첨자 ^는 추정된 값을 나타낸다. 고정자자속의 크기와 변화율은 $\alpha-\beta$ 정지좌표계에서 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$|\hat{\lambda}_s| = \hat{\lambda}_{ds} = \sqrt{(\hat{\lambda}_{\alpha s}^2 + \hat{\lambda}_{\beta s}^2)} \quad (1)$$

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \frac{\hat{\lambda}_{\beta s}}{\hat{\lambda}_{\alpha s}} \quad (2)$$

d-q 회전좌표계에서 슬립속도 및 비간섭보상전류는 각각 식 (3), 식 (4)와 같다[8].

$$\omega_{sl} = \frac{(1 + \sigma\tau_r p)L_s i_{qs}}{\tau_r (\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds})} \quad (3)$$

$$i_{dq} = \frac{\omega_{sl} \tau_r \sigma i_{qs}}{(1 + \sigma\tau_r p)} = \frac{i_{qs}^2 \sigma L_s}{\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds}} \quad (4)$$

여기서 $\tau_r = L_r/R_r$, L_r = 회전자자기인덕턴스, R_r = 회전자저항, $\sigma = 1 - L_m^2/(L_s L_r)$, L_s = 고정자자기인덕턴스, L_m = 자화인덕턴스, $p = d/dt$, i_{qs} = q축 고정자전류, i_{ds} = d축 고정자전류이다.

고정자자속은 식 (5)와 같이 역기전력을 적분하여 구한다.

$$\hat{\lambda}_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (5)$$

여기서 v_s 와 i_s 는 각각 정지좌표계에서의 고정자 전압벡터와 고정자전류벡터이다.

토크는 식 (6)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{4} P_m \lambda_{ds} i_{qs} \quad (6)$$

여기서 P_m 은 극수이다.

인버터 입력 P_d 는 직류링크 전압 V_{dc} 와 전류 I_{dc} 의 곱으로 구하며 식 (7)과 같다.

$$P_d = V_{dc} I_{dc} \quad (7)$$

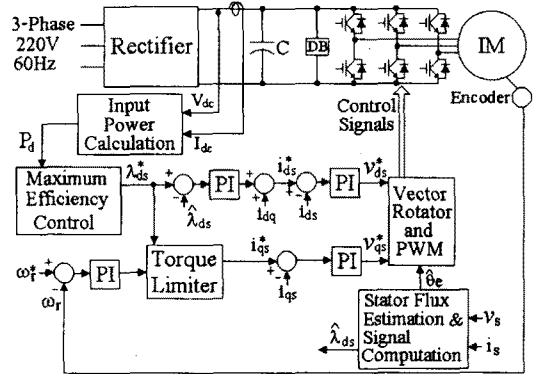


그림 1. 고정자자속기준벡터제어 블록도
Fig. 1. Stator flux-oriented control drive system

3. 최대효율제어

자속의 값을 미리 정해진 양 만큼 변화시키면서 효율이 최대가 되는 점을 찾는 최대효율제어방법은 동작중인 자속과 효율이 최대가 되는 자속이 차이가 클 경우 수렴시간이 커지게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 주어진 속도와 토크에서 효율이 최대가 되는 자속을 계산으로 구한 후 이 자속을 초기자속으로 하여 미리 정해진 양만큼 자속을 변화시키면서 최대효율제어를 수행하는 방

법을 제안한다.

제안한 방법은 먼저 5개의 주어진 속도와 토크에서 효율이 최대가 되는 자속을 구한다. 다음에 속도, 토크, 자속의 3차원 공간에서 토크와 속도를 변수로 했을 때 표현되는 자속의 곡면을 5개의 자속을 이용하여 근사화시키면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = aT_e^2 + bT_e + cR^2 + dR + e \quad (8)$$

여기서 R은 속도, λ 는 자속을 나타내며 a, b, c, d, e는 계수를 나타낸다.

주어진 토크와 자속을 식 (8)에 대입하여 자속 λ 를 계산한 후 이 자속을 초기값으로 하여 최대효율제어를 수행한다. 최대효율제어는 [6]에서 제안한 방법으로서 미리 정해진 양($\Delta\lambda_{ds}$) 만큼 자속을 변화시키면서 효율이 최대가 되는 점을 찾는 방법이다.

표 1. 유도전동기 파라미터
Table 1. Induction Motor Parameters

3상, 3.7[kW], 4극	
rated line current 18.95[A](peak), 1,710[rpm]	
고정자저항	1.26[Ω]
회전자저항	0.21[Ω]
자화인덕턴스	50[mH]
고정자누설인덕턴스	4.7[mH]
회전자누설인덕턴스	4.7[mH]

표 2. 속도 및 부하에 따른 최대효율 자속
Table 2. Flux for maximum efficiency

300[rpm]		1,000[rpm]		1,700[rpm]	
토크 [N·m]	자속 [Wb]	토크 [N·m]	자속 [Wb]	토크 [N·m]	자속 [Wb]
3	0.26	3	0.222	3	0.194
5	0.335	5	0.287	5	0.245
		7	0.34	7	0.285
7	0.395	9	0.384	9	0.325
		11		11	0.365
		13		13	0.395

식 (8)의 자속곡면을 구하기 위하여 ACSL을 이용하여 다음과 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 전류제

어주기는 125[μs]이며, 속도제어주기와 자속제어주기는 각각 1.25[ms]이다. $\Delta\lambda_{ds}$ 는 0.0045[Wb]이다. 입력 P_d 의 계산은 125[μs]의 주기로 수행되며, 저역통과필터 $50/(s+50)$ 를 통과시킨다. 최대효율제어의 주기는 양호한 제어가 되도록 시행착오로 250[ms]로 하였다. 전동기는 표 1의 3상 유도전동기를 사용하였다.

표 2는 300[rpm], 1,000[rpm], 1,700[rpm]의 3개의 속도에서 토크를 변화시키면서 효율이 최대가 되는 자속을 구한 결과이다. 주어진 속도와 토크에서 자속을 0.0008[Wb] 만큼씩 변화시키면서 입력을 계산한 후 입력이 최소가 되는 자속을 구한 것이다.

그림 2는 토크변화에 따른 자속의 파형을 나타내고 있으며, 그림 3은 속도변화에 따른 자속의 파형을 나타내고 있다.

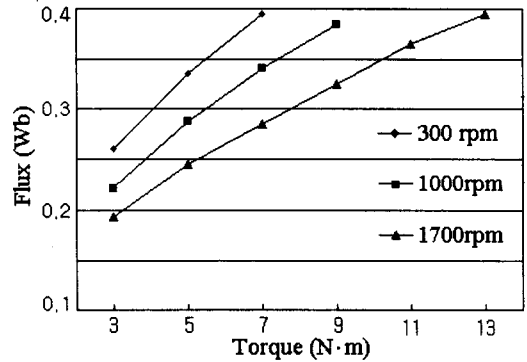


그림 2. 토크변화에 따른 자속
Fig. 2. Flux vs. torque

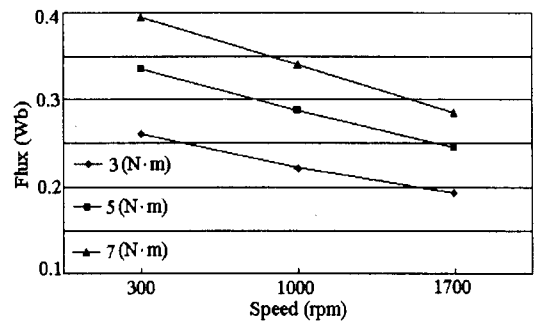


그림 3. 속도변화에 따른 자속
Fig. 3. Flux vs. speed

유도전동기의 신속한 최대효율제어

식 (8)의 자속곡면의 5개의 계수를 구하기 위하여 5개의 동작점이 필요하다. 5개 동작점의 선정은 사용하고자 하는 유도전동기가 동작하는 속도와 토크의 범위를 고려하여 속도와 토크의 모든 범위를 포함하도록 선정한다. 동작점을 (R, T_e, λ) 로 표현했을 때 (1000, 7, 0.34)를 중심점으로 하여 속도는 일정하게 하고 토크만 변화시킨 (1000, 5, 0.287), (1000, 9, 0.384)을 선정하였으며, 나머지 2개의 점은 토크는 일정하게 하고 속도만 변화시킨 (300, 7, 0.395), (1700, 7, 0.285)를 선정하였다. 이러한 5개의 점을 이용하여 식 (8)의 계수를 구하면 식 (9)와 같다.

$$\lambda = -0.001125 T_e^2 + 0.04 T_e - 0.000078571 R + 0.193696 \quad (9)$$

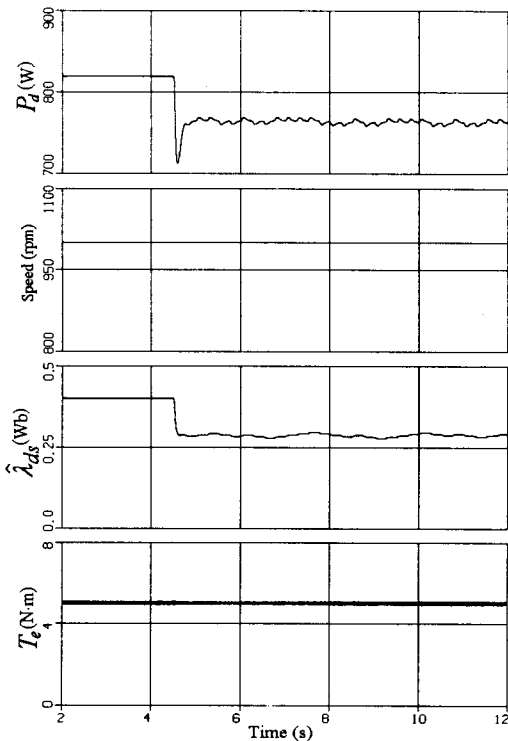


그림 4. 최대효율제어결과
(1,000[rpm], 부하 : 5[N·m])
Fig. 4. maximum efficiency control
(1,700[rpm], 5[N·m])

4. 시뮬레이션 결과

그림 4는 1,000[rpm], 부하 5[N·m]에서 최대효율

제어의 결과를 나타내고 있다. 0.4[Wb]의 정격자속에서 운전되다가 4.5초에 최대효율제어가 시작된다. 4.5초에 식 (9)에 의한 자속은 0.288[Wb]로 계산되었으며, 이 값을 초기값으로 최대효율제어를 수행함을 나타내고 있다. 최대효율제어가 신속히 수행하고 있으며, 토크와 속도는 최대효율제어 수행 동안 일정함을 나타내고 있다. 최대효율을 위한 자속은 0.287[Wb]이며 식 (9)에 의한 계산값 0.288[Wb]는 0.35[%]의 오차로 대단히 정확하게 계산되었음을 알 수 있다.

그림 5는 1,700[rpm], 부하 11[N·m]에서 수행한 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다. 식 (9)에 의한 자속은 0.3646[Wb]로 계산되었으며, 이 값을 초기값으로 최대효율제어가 참고문헌 [6]의 결과와 비교하여 신속히 수행됨을 알 수 있다. 최대효율을 위한 자속은 0.365[Wb]이며 0.3646[Wb]와의 오차는 0.1[%]로 오차가 매우 적음을 알 수 있다.

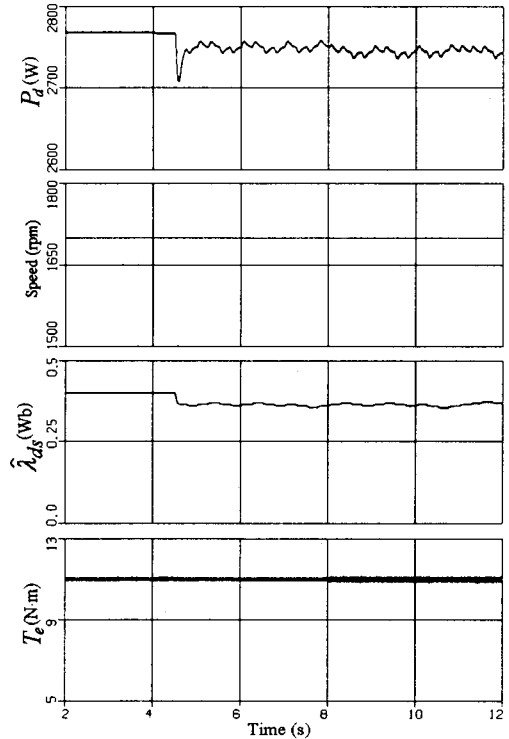


그림 5. 최대효율제어결과
(1,700[rpm], 부하 : 11[N·m])
Fig. 5. Maximum efficiency control
(1,700[rpm], 11[N·m])

그림 6은 300[rpm], 부하 3[N·m]에서 수행한 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다. 식 (9)에 의한 자속은 0.28[Wb]로 계산되었다. 최대효율제어를 위한 자속은 0.26[Wb]이며 0.28[Wb]와의 오차는 7.7[%]로 이전의 결과에 비해서 오차가 증가했음을 알 수 있다. 그러나 짧은 시간에 최대효율제어를 위한 자속으로 수렴하고 있음을 나타내고 있다.

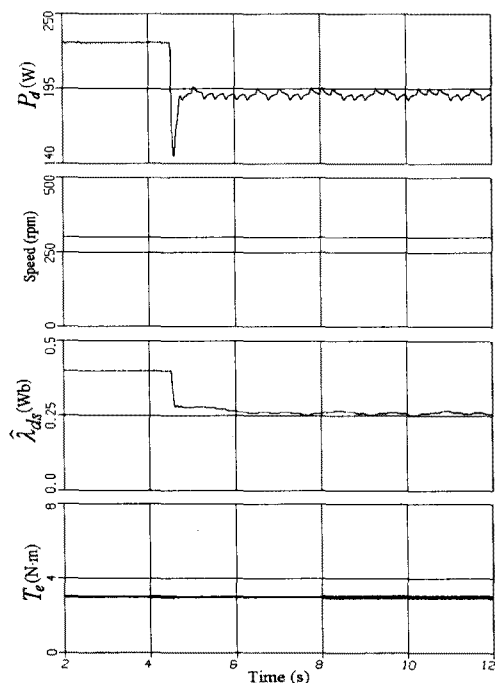


그림 6. 최대효율제어결과(300(rpm), 부하 : 3(N·m))
 Fig. 6. Maximum efficiency control (300(rpm), 3(N·m))

5. 결 론

효율이 최대가 되는 5개의 동작점을 이용하여 최대효율의 자속의 곡면을 구한 후 주어진 속도와 자속에서 곡면을 이용하여 자속을 구하고, 이 자속을 초기값으로 하여 최대효율제어를 수행하였다.

시뮬레이션 결과, 제안한 방법에 의해서 신속한 최대효율제어가 가능하였으나 동작점에 따라 자속의 초기값 계산에 오차가 다소 증가하는 현상이 발생하였으며, 오차를 줄이기 위한 연구가 향후과제로 필요함을 알 수 있었다.

References

- (1) J. C. Moreira, T. A. Lipo, and V. Blasko, "Simple efficiency maximizer for an adjustable frequency induction motor drive," *IEEE Trans. on IA*, vol.27, pp.940-946, 1991.
- (2) G. C. D. Sousa, B. K. Bose, and J. G. Cleland, "Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive," *IEEE Trans. on IE*, vol.42, pp.192-198, 1995.
- (3) C.-M. Ta and Y. Hori, "Convergence improvement of efficiency optimization control of induction motor drives," *IEEE Trans. on IA*, vol.37, pp.1746-1753, 2001.
- (4) C. Chakraborty and Y. Hori, "Fast efficiency optimization techniques for the indirect vector-controlled induction motor drives," *IEEE Trans. on IA*, vol.39, pp.1070-1076, 2003.
- (5) B. K. Bose, N. R. Patel and K. Rajashekara, "A Neuro-Fuzzy-Based On-Line Efficiency Optimization Control of a Stator Flux-Oriented Direct Vector-Controlled Induction Motor Drive," *IEEE Trans. IE*, vol. 44, no. 2, pp. 270-273, 1997.
- (6) M.-H. Shin, "Maximum efficiency control of a stator flux-oriented induction motor drive" *Journal of KIIE*, vol. 20, no. 4, pp. 117-122, 2006.
- (7) M.-H. Shin, "Improved Maximum Efficiency Control of a Stator Flux-Oriented Induction Motor Drive" *Journal of KIIE*, vol. 22, no. 5, pp. 58-63, 2008.
- (8) X. Xu, R. D. Doncker, and D. W. Novotny, "A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive," *IEEE PESC88*, pp. 870-876, 1988.

◆ 저자소개 ◆

신명호 (申明昊)

1967년 11월 27일생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년~1996년 삼성종합기술원 근무(선임연구원). 2002년 8월~현재 서울산업대학교 전기공학과 부교수.