

유도전동기 고정자자속기준제어의 개선된 최대효율제어

(Improved Maximum Efficiency Control of a Stator Flux-Oriented Induction Motor Drive)

신명호*

(Myoung-Ho Shin)

요 약

유도전동기 고정자자속 기준제어의 최대효율제어를 위한 초기자속값의 계산방법을 제안한다. 3개의 자속에 대한 입력을 계산한 후 3점을 2차 보간하여 2차 함수의 최소점, 즉 입력이 최소가 되는 자속을 구하고, 이 자속을 초기값으로 하여 최대효율제어를 수행한다. 시뮬레이션 결과 기존의 방법에 비해서 제안한 방법에 의하여 최대효율점으로서의 수렴시간이 단축됨을 보인다.

Abstract

A fast maximum efficiency control scheme of a stator flux-oriented control of an induction motor is proposed. Three inputs of given three magnetic fluxes are calculated. Then, magnetic flux for minimum input is calculated by quadratic interpolation method and maximum efficiency control is fulfilled with the calculated magnetic flux for minimum input. Simulation results verify the effectiveness of the scheme.

Key Words : Induction motor, Fast maximum efficiency control, Convergence improvement

1. 서 론

전기에너지의 50[%] 이상을 전동기가 소비하고 있으며, 이 중 거의 대부분을 유도전동기가 소비하고 있다. 유도전동기의 자속은 우수한 과도응답을 위하여 정격자속이 되도록 제어를 한다. 그러나 경부하의 조건에서 정격자속의 값으로 제어하면 과도한 철손의 발생으로 인하여 전동기의 효율이 저하되

는 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 유도전동기의 최대효율제어에 관한 연구들이 진행되어 왔다[1-6].

최대효율제어를 위한 방법 중 전동기의 입력을 측정하고 자속을 미리 정해진 양만큼 변화시키면서 입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 방법이 있다. 이 방법은 전동기의 파라미터를 몰라도 되며 파라미터의 변화와 무관하며, 전동기의 입력만 알면 되는 장점을 가지고 있다. 그러나 효율이 최대가 되는 자속의 값을 찾기 위해서는 많은 시간을 필요로 하는 단점이 존재한다[2-4].

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 2001년에 참고 문헌 [3]이 발표되었다. [3]에서 저자는 최대효율점

* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 조교수
Tel : 02-970-6408, Fax : 02-978-2754
E-mail : mhshin@snut.ac.kr
접수일자 : 2008년 1월 22일
1차심사 : 2008년 2월 11일
심사완료 : 2008년 2월 29일

을 찾기 위하여 Golden Section 방법을 사용하였으며, 최대효율점에서의 수렴시간을 단축시키는 효과를 얻었다. 그러나 아직도 수렴시간을 단축시키기 위한 연구의 필요성은 많이 남아있는 실정이다.

참고문헌 [6]은 고정자자속기준제어의 최대효율제어에 관한 논문으로서 미리 정해진 양만큼 자속의 값을 변화시키면서 입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 방법이다. 그러나 이 방법에서 초기 자속의 값과 최대효율점의 자속의 값의 차이가 큰 경우 최대효율점에서의 수렴시간이 증가하는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 유도전동기 최대효율제어의 수렴시간을 단축시키기 위하여 참고문헌 [3]과는 다른 또 하나의 방법을 제안한다. 먼저 3개의 자속값에 대한 효율을 계산한 후 3개의 점을 이용하여 2차 보간법을 사용해서 효율이 최소가 되는 자속값을 찾고 이 값을 초기값으로 하여 최대효율제어를 수행하여 [6]에서 제안한 방법에 비해서 수렴시간이 단축됨을 보인다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 방법의 타당성을 입증한다.

2. 고정자자속기준제어

그림 1은 제안한 최대효율제어방법을 갖는 고정자자속기준제어시스템을 나타내고 있다. 그림에서 첨자 *는 변수의 지령치를 나타낸다. 고정자자속의 크기와 변환각은 α - β 정지좌표계에서 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

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

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

여기서 첨자 ^는 추정된 값을 의미한다.

d-q 회전좌표계에서 슬립속도 및 비간섭보상전류는 각각 식 (3) 및 식 (4)와 같다[7].

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

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

여기서 $\tau_r = L_r / R_r$, L_r =회전자자기인덕턴스, R_r =회전자저항, $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$, L_s =고정자 자기인덕턴스, L_m =자화인덕턴스, $p = d/dt$ 는 미분연산자, 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 고정자전압벡터와 고정자전류벡터이다. 식 (5)의 적분은 programmable low pass filter를 이용해서 계산하였다[8].

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 식 (7)과 같이 직류링크 전압 V_{dc} 와 전류 I_{dc} 의 곱으로 구할 수 있다.

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

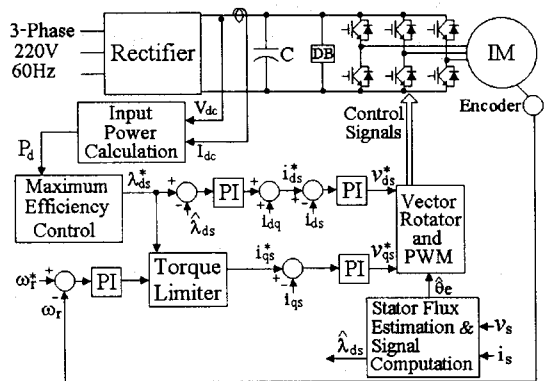


그림 1. 고정자자속기준벡터제어 블록도
Fig. 1. Stator flux-oriented control drive system

3. 2차보간법에 의한 초기자속 계산

자속의 값을 미리 정해진 양만큼 변화시키면서 효율이 최대가 되는 점을 찾을 경우 동작중인 자속의 값과 효율이 최대가 되는 자속의 값이 차이가 클 경우 많은 수렴시간을 필요로 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 최대효율제어를 위한 자속의 초기값을 계산하기 위하여 다음의 방법을 제안한다.

먼저 3개의 자속 λ_{ds1} , λ_{ds2} , λ_{ds3} 에 대한 입력 P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} 를 측정하고, 측정된 3점을 이용하여 2차 보간법을 적용하면 식 (8)과 같고 2차 곡선의 최소가 되는 자속의 값 $\lambda_{ds,min}$ 을 계산하면 식 (9)와 같다. 그림 2의 2차 곡선이 유도전동기의 입력곡선과 일치하지는 않지만 유사한 것으로 보고 식 (9)로 계산된 자속의 값을 초기값으로 하여 최대효율제어를 수행한다.

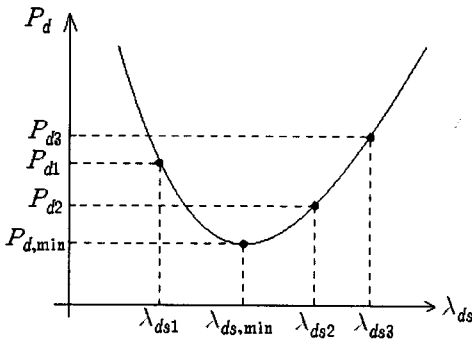


그림 2. 2차 보간법에 의한 입력
Fig. 2. Input power by quadratic interpolation method

$$P_d = a + b\lambda_{ds} + c\lambda_{ds}^2 \quad (8)$$

$$\lambda_{ds,min} = -\frac{b}{2c} = \frac{P_{d1}(\lambda_{ds2}^2 - \lambda_{ds3}^2) + P_{d2}(\lambda_{ds3}^2 - \lambda_{ds1}^2) + P_{d3}(\lambda_{ds1}^2 - \lambda_{ds2}^2)}{2[P_{d1}(\lambda_{ds2} - \lambda_{ds3}) + P_{d2}(\lambda_{ds3} - \lambda_{ds1}) + P_{d3}(\lambda_{ds1} - \lambda_{ds2})]} \quad (9)$$

4. 최대효율제어

그림 3은 최대효율제어 흐름도를 나타내고 있다.

2차 보간법으로 계산된 최소입력 자속 $\lambda_{ds,min}$ 을 초기값으로 하여 정해진 자속의 값 $\Delta\lambda_{ds}$ 만큼 기준자속의 값을 변화시키면서 입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 방법이다. 처음에(k=1) 기준자속의 값은 $\lambda_{ds,min}$ 이 되며, 다음단계(k=2)에서 P_d 가 측정되고 지령자속은 $\Delta\lambda_{ds}$ 만큼 감소된다. 그 다음의 단계에서 측정된 $P_d(k)$ 는 이전단계의 $P_d(k-1)$ 과 비교되며, 다음에 기준자속의 증가 또는 감소로부터 입력이 감소하는 새로운 지령자속 $\lambda_{ds}^*(k)$ 를 만든다.

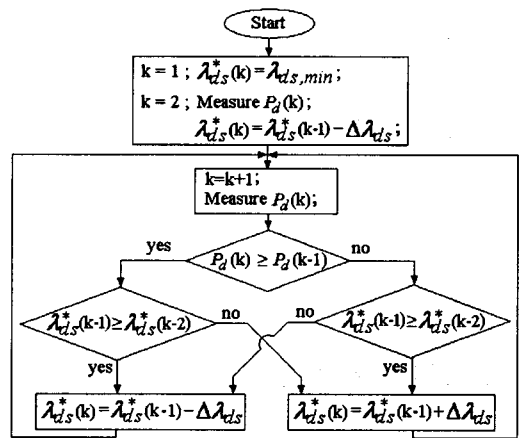


그림 3. 입력을 최소화하기 위한 흐름도
Fig. 3. Flowchart of minimization of input power

5. 시뮬레이션 결과

제안한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전류제어주기는 125[μs]이며, 속도제어주기와 자속제어주기는 각각 125[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 187.5[ms]로 하였다. 전동기는 표 1의 3상 유도전동기를 사용하였다.

그림 4는 자속의 변화에 따른 입력 P_d 를 나타내고 있다. 속도는 1,700[rpm]이며 부하는 5[N·m]이다. 자속의 값이 약 0.245[Wb]에서 입력이 약 1,245[W]의 값으로 최소가 됨을 나타내고 있다. 또한 곡선의 형상이 2차 곡선과 유사함을 알 수 있다.

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]

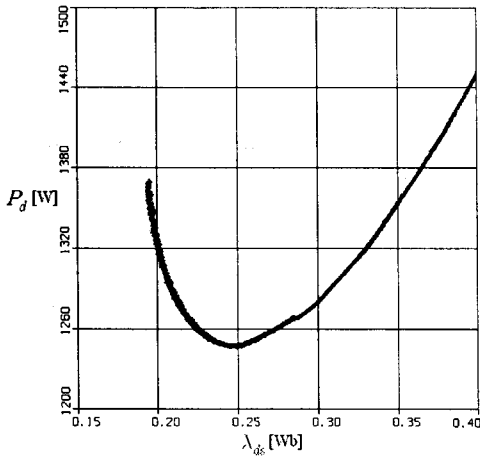


그림 4. 자속변화에 따른 P_d (1700(rpm), 부하 : $5(N \cdot m)$)
Fig. 4. P_d vs. flux(1700(rpm), $5(N \cdot m)$)

그림 5는 1,700[rpm], 부하 $5[N \cdot m]$ 의 조건의 기존방법에 의한 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다. 자속은 $0.4[Wb]$ 의 초기값에서 시작하여 정상상태에서 약 $0.245[Wb]$ 가 되었으며, 이때 입력 P_d 는 약 $1,245[W]$ 정도가 되고 있음을 나타내고 있다. 최대효율제어 알고리즘은 3초에 시작이 되어 약 9.2초에 최대효율점에 도달하게 되는 모습을 나타내고 있다. 최대효율제어에 의해서 d축 전류는 감소하고, q축 전류는 증가하다가 정상상태에서 q축 전류가 d축 전류보다 약간 높은 모습을 나타내고 있다.

그림 6은 1,700[rpm], 부하 $5[N \cdot m]$ 의 조건의 제안한 방법에 의한 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다. 최대효율제어를 위한 초기자속의 계산을 위하여 $\lambda_{ds1}=0.24[Wb]$, $\lambda_{ds2}=0.32[Wb]$, $\lambda_{ds3}=0.4[Wb]$ 로

설정하였다. 3초에 지령자속을 λ_{ds3} 로 하여 입력을 계산한 후 지령자속을 λ_{ds2} 로 변경하여 입력을 계산하고, 그 다음에 지령자속을 λ_{ds1} 으로 바꾸어 입력을 계산한다. 그림 6의 자속과형에서 3초부터 자속이 λ_{ds3} , λ_{ds2} , λ_{ds1} 의 순으로 변하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 해서 얻은 3개의 점을 이용하여 2차 보간법으로 2차 함수를 만들고 입력이 최소가 되는 자속을 계산한 결과 $0.23[Wb]$ 로 계산되었다. 그 다음에 $0.23[Wb]$ 의 값을 초기값(그림 3의 $\lambda_{ds, min}$)으로 하여 자속을 $\Delta\lambda_{ds}$ 만큼씩 변화시키면서 최대효율제어를 수행하게 된다. 그림 6의 자속과형에서 보면, 약 5초에 최대효율점에 도달하였음을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 그림 5의 기존의 방법과 비교해 보면, 최대효율점에 도달하는데 걸리는 시간이 제안한 방법에 의해서 약 4.2초 정도 감소되었음을 알 수 있다. 그림 6의 토크과형을 보면, 초기 자속을 찾기 위하여 자속을 변화시키면서 입력을 계산하는 과정에서 갑작스런 자속의 변화로 약간의 토크의 변화가 있음을 알 수 있다.

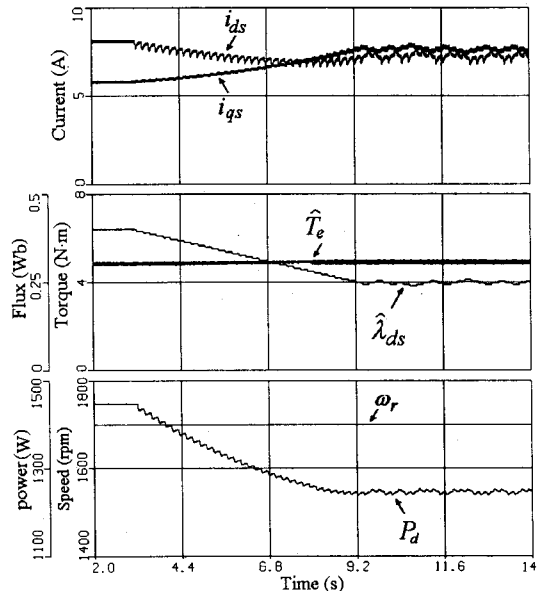


그림 5. 기존방법에 의한 최대효율제어결과 (1,700(rpm), 부하 : $5(N \cdot m)$)
Fig. 5. Conventional maximum efficiency control (1,700(rpm), $5(N \cdot m)$)

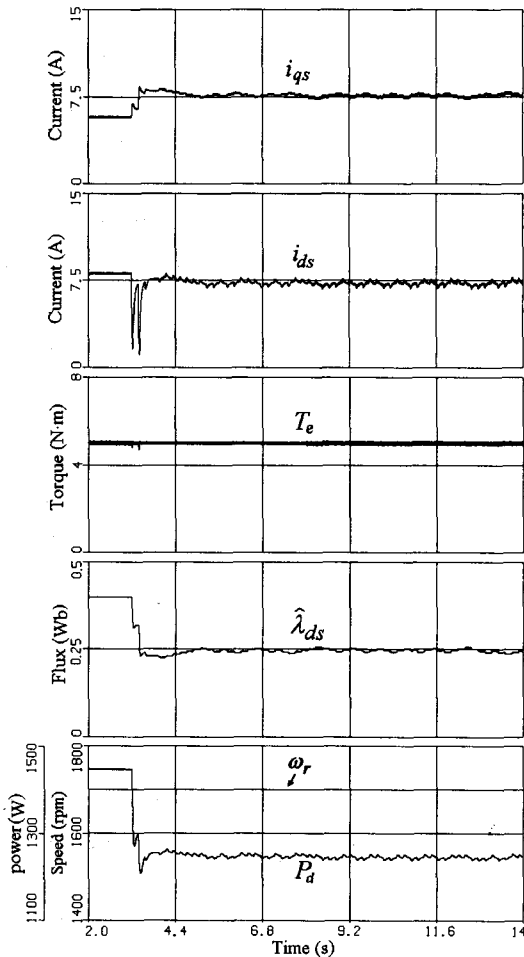


그림 6. 제안한 방법에 의한 최대효율제어결과
 (1,700[rpm], 부하 : 5[N·m], $\lambda_{ds1} = 0.24$,
 $\lambda_{ds2} = 0.32$, $\lambda_{ds3} = 0.4$)
 Fig. 6. Proposed maximum efficiency control
 (1,700[rpm], 5[N·m], $\lambda_{ds1} = 0.24$,
 $\lambda_{ds2} = 0.32$, $\lambda_{ds3} = 0.4$)

그림 7은 1,700[rpm], 부하 5[N·m]의 조건의 제안한 방법에 의한 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다. 그림 6과 조건은 같으나 $\lambda_{ds1} = 0.28$ [Wb], $\lambda_{ds2} = 0.34$ [Wb], $\lambda_{ds3} = 0.4$ [Wb]로 다르게 설정하였다. 최대효율제어를 위한 초기자속이 0.21[Wb]로 계산되었으며, 이 때문에 최대효율점에서의 수렴시간이 그림 6의 결과에 비해서 약 0.6초 정도 지연되었음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 초기자속 $\lambda_{ds, min}$ 의

계산을 위한 3개의 자속 λ_{ds1} , λ_{ds2} , λ_{ds3} 의 설정이 수렴시간의 결정에 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 토크과형을 보면 그림 6의 결과와 마찬가지로 $\lambda_{ds, min}$ 의 계산 과정에서 약간의 리플이 발생함을 알 수 있다.

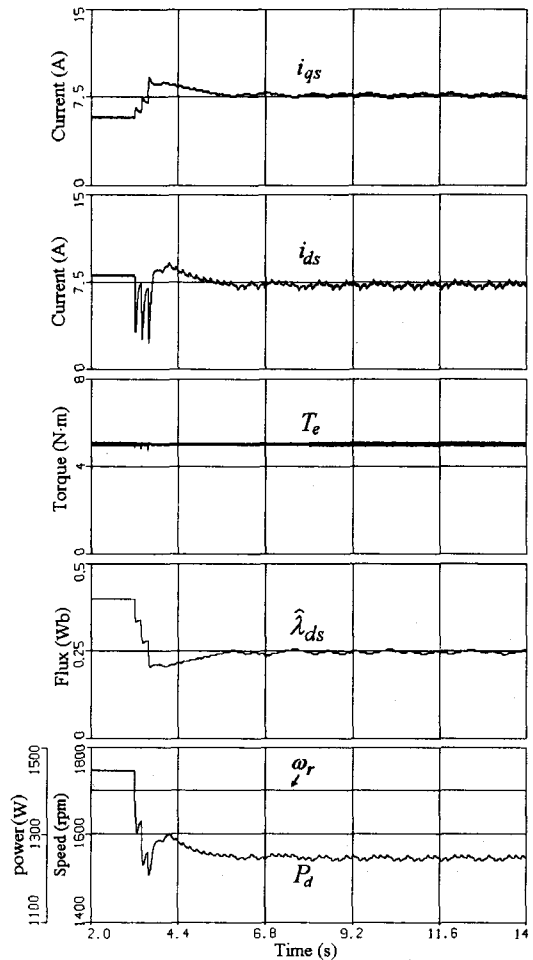


그림 7. 제안한 방법에 의한 최대효율제어결과
 (1,700[rpm], 부하 : 5[N·m], $\lambda_{ds1} = 0.28$,
 $\lambda_{ds2} = 0.34$, $\lambda_{ds3} = 0.4$)
 Fig. 7. Proposed maximum efficiency control
 (1,700[rpm], 5[N·m], $\lambda_{ds1} = 0.28$,
 $\lambda_{ds2} = 0.34$, $\lambda_{ds3} = 0.4$)

6. 결 론

유도전동기 고정자자속 기준제어의 최대효율제어의 수렴시간을 감소시키기 위한 방법을 제안하였다. 3개의 주어진 자속에 대한 입력을 구하고, 3점을 이용하여 2차 보간법을 적용하여 입력이 최소가 되는 자속을 찾은 후, 이 자속을 초기값으로 최대효율제어를 수행한 결과 기존의 방법에 비해서 최대효율점으로의 신속한 수렴이 가능함을 보였다.

그러나 초기자속을 구하는 과정에서 발생하는 약간의 토크리플을 저감하기 위한 연구와, 초기자속을 구하기 위한 3개의 자속(λ_{ds1} , λ_{ds2} , λ_{ds3})의 최적의 선정에 관한 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] Myoung-Ho Shin, "Maximum efficiency control of a stator flux-oriented induction motor drive" Journal of KIIEE, vol. 20, no. 4, pp. 117-122, 2006.
- [7] X. Xu, R. D. Doncker, and D. W. Novotny, "A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive," IEEE PESC88, pp. 870-876, 1988.
- [8] M.-H. Shin, D.-S. Hyun, S.-B. Cho, and S.-Y. Choe, "An improved stator flux estimation for speed sensorless stator flux orientation control of induction motors," IEEE Trans. PE, vol. 12, pp.312-318, 2000.

◇ 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). 1991~1996년 삼성종합기술원 근무(선입연구원). 2002년 8월~현재 서울산업대학교 전기공학과 조교수.