

# 유도전동기 고정자자속 기준제어의 최대효율제어에서 부하증가로 인한 문제 해결방법

(Technique to Solve Problems Due to Load Increment in Maximum Efficiency Control of Stator Flux-Oriented Induction Motor Drive)

신명호\*

(Myoung-Ho Shin)

## 요 약

유도전동기 고정자자속 기준제어의 최대효율제어에서 경부하시 자속은 작은 값이 된다. 이러한 상태에서 갑자기 부하가 증가하였을 경우 전동기는 부하토크에 대응하는 토크를 발생시켜야 하지만, 낮은 자속 때문에 토크제한조건에 의한 토크성분전류는 작은 값으로 제한되며, 부하토크에 대응하는 토크를 발생시키지 못해서 속도제어가 안 되는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법을 제안한다.

## Abstract

Flux level is low in the maximum efficiency control of a stator flux-oriented control of induction motor under the light load. In this case, if the load torque is suddenly increased, torque component current is limited to the low level by torque-limit condition because of the low flux level. In this paper, a technique to solve the problem is proposed.

Key Words : Induction motor, Maximum efficiency control, Stator flux-oriented

## 1. 서 론

전기에너지의 50[%] 이상을 전동기가 소비하고 있으며, 이 중 거의 대부분을 유도전동기가 소비하고 있다. 따라서 유도전동기의 최대효율제어에 관한 연구들이 진행되어 왔다[1-6].

최대효율운전을 위한 방법 중 전동기의 입력을 측정하고 자속을 미리 정해진 양 만큼 변화시키면서 입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 방법이 있는데, 이 방법은 전동기의 파라미터를 몰라도 되며 파라미터의 변화와 무관한 장점을 가지고 있다. 이 방법은 회전자자속기준제어에만 적용되어 왔으나, 파라미터 변동에 대한 강인함의 장점을 가지고 있는 고정자 자속기준제어가 널리 사용되면서, 고정자자속 기준제어의 최대효율제어에 관한 논문이 발표되었다[5-6]. 그러나 갑작스런 부하증가에 의한 운전 특성은 제시되지 않았다.

\* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 조교수  
Tel : 02-970-6408, Fax : 02-978-2754

E-mail : mhshin@snut.ac.kr  
접수일자 : 2006년 12월 11일  
1차심사 : 2006년 12월 18일  
심사완료 : 2007년 1월 4일

유도전동기 고정자자속기준제어에서 지령토크의 값은 제어시스템의 안정성을 위해서 토크제한조건에 의해서 제한된다[7]. 경부하시 최대효율제어를 수행하면 자속의 값은 작게 되며, 자속의 함수인 토크 제한도 작은 값이 되게 된다. 이러한 상태에서 부하토크가 갑자기 증가될 경우 토크성분전류가 증가해서 증가된 부하토크에 대응하는 전동기토크를 발생하여 속도제어를 수행해야 하는데, 낮은 토크제한조건에 의해서 토크성분전류는 낮은 값으로 제한되며, 부하토크에 대응하는 전동기토크를 출력하지 못해서 속도제어가 안 되는 문제가 발생한다.

본 논문에서는 최대효율제어 중 일정토크영역에서 부하토크가 갑자기 증가되었을 때 토크제한조건에 의해서 증가된 부하토크에 대응하는 토크를 전동기가 출력하지 못하여 토크제어가 안 되는 문제를 보인 후 이를 해결하기 위한 방법을 제안한다. 시뮬레이션결과 및 실험결과를 통해서 제안한 방법의 타당성을 입증한다.

## 2. 고정자자속기준제어

그림 1은 제안한 최대효율제어방법을 갖는 고정자자속기준제어시스템을 나타내고 있다. 그림에서 첨자 \*는 변수의 지령치를 나타낸다. 고정자자속의 크기와 변환각은  $\alpha-\beta$  정직좌표계 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$|\lambda_{ds}| = \lambda_{ds} = \sqrt{(\lambda_{ds}^2 + \lambda_{qs}^2)} \quad (1)$$

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \quad (2)$$

여기서 첨자 ^는 추정된 값을 의미한다.

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

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

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

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.

$$\lambda_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (5)$$

여기서  $v_s$ 와  $i_s$ 는 각각 정직좌표계에서의 고정자전압벡터와 고정자전류벡터이다. 식 (5)의 적분은 programmable low pass filter를 이용해서 계산하였다[8].

고정자자속기준제어에서 전동기토크  $T_e$ 는 식 (6)과 같다. 유도전동기는 안정된 제어를 위해서 식 (7)의 토크제한조건을 만족하여야 한다[7]. 토크제한조건을 토크성분전류로 나타내면 식 (8)과 같다.  $T_{e-l}$ 와  $i_{q-l}$ 는 각각 토크제한조건을 고려한 최대토크와 최대전류이다.

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

$$T_e^* \leq \frac{3}{4} P_m \frac{(1-\sigma)}{2\sigma L_s} \lambda_{ds}^* i_{qs}^* = T_{e-l} \quad (7)$$

$$i_{qs}^* \leq \frac{(1-\sigma)}{2\sigma L_s} \lambda_{ds}^* = i_{q-l} \quad (8)$$

여기서  $P_m$ 은 극수이다.

식 (9)는 전류제한조건을 나타내고 있다. q축 전류는 토크제한조건 이외에 전류제한조건에 의해 제한되는데, 최대 고정자전류  $I_{sm}$ 은 좋은 과도특성을 위해서 정격전류의 1.5배로 한다.

$$|i_{qs}^*| \leq \sqrt{I_{sm}^2 - i_{ds}^{*2}} = i_{q-c} \quad (9)$$

여기서  $i_{q-c}$ 는 전류제한조건을 고려한 최대전류이다.

따라서  $i_{qs}$ 는 토크제한조건과 전류제한조건 중

작은 값에 의해서 제한된다.

인버터 입력  $P_d$ 는 식 (10)과 같이 직류링크 전압  $V_{dc}$ 와 전류  $I_{dc}$ 의 곱으로 구할 수 있다.

$$P_d = V_{dc} I_{dc} \quad (10)$$

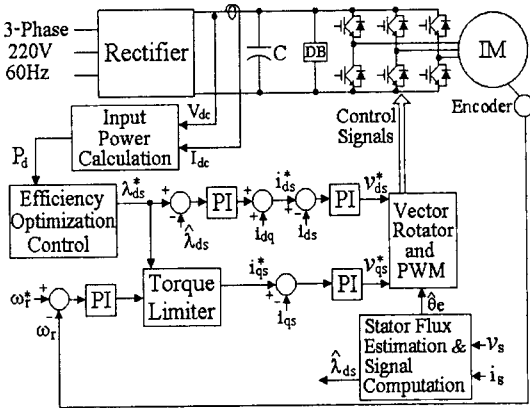


그림 1. 고정자자속기준 벡터제어 블록도  
Fig. 1. Stator flux-oriented control drive system

### 3. 최대효율제어

그림 2는 최대효율제어 흐름도를 나타내고 있다[6].

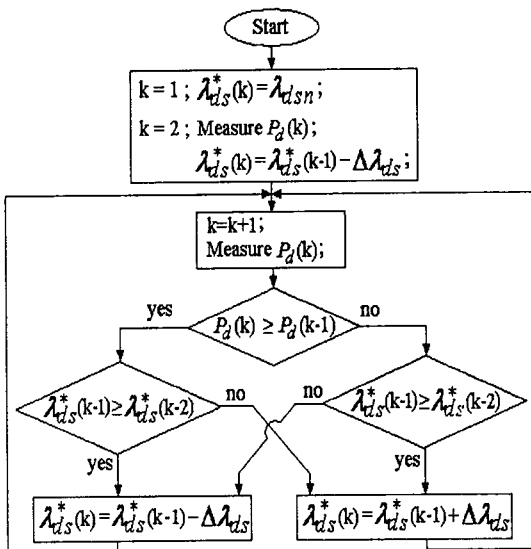


그림 2. 입력을 최소화하기 위한 흐름도  
Fig. 2. Flowchart of minimization of input power

정해진 자속의 값  $\Delta \lambda_{ds}$ 만큼 기준자속의 값을 변화시키면서 입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 방법이다. 처음에(k=1) 기준자속의 값은 정격자속  $\lambda_{dsn}$ 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.

### 4. 제안한 방법

경부하에서 최대효율제어를 수행하면 자속의 값은 작으며, 자속의 함수인 식 (7)의 토크제한은 자속의 값이 작기 때문에 작은 값이 된다. 이러한 상태에서 부하토크가 갑자기 토크제한을 초과하는 값으로 증가할 경우 전동기토크는 토크제한에 의해서 부하토크에 대응하는 토크를 출력하지 못해서 속도제어가 안 되는 문제가 발생하게 된다.

부하토크가 갑자기 증가되었을 때 토크성분전류의 지령치  $i_{qs}^*$ 는 증가하게 되고 토크제한조건에 의해서  $i_{qs}^*$ 가  $i_{q-l}$ 와 일치하게 된다. 이 때 식 (11)과 같이 기준자속의 값을 정격자속  $\lambda_{dsn}$ 으로 증가시키면  $i_{q-l}$ 가 증가하여  $i_{qs}^*$ 는 부하토크에 대응하는 값으로 증가하게 된다.  $i_{qs}^*$ 와  $i_{q-l}$ 의 일치하는 전류 제어주기와 같은 주기로 판단하며, 일치하게 되면 지령자속은 즉시 정격자속의 값이 된다.

$$\lambda_{ds}^* = \lambda_{dsn}, \text{ if } (i_{qs}^* = i_{q-l}) \quad (11)$$

### 5. 시뮬레이션 결과

제안한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다.  $\Delta \lambda_{ds}$ 는 0.0045[Wb]이며, 최대 효율제어의 주기는 양호한 제어가 되도록 시행착오로 187.5[ms]로 하였다. 전동기는 표 1의 3상 유도전동기를 사용하였다.

그림 3은 1500[rpm], 부하 5[N·m]의 조건의 기준 방법에 의한 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다.

자속은 0.4[Wb]의 초기값에서 시작하여 정상상태에서 약 0.26[Wb]가 되었으며, 이때 입력  $P_d$ 는 약 1106[W]가 되고 있음을 나타내고 있다. 최대효율제어에 의해서 d축 전류는 감소하고, q축 전류는 증가하다가 정상상태에서 q축 전류가 d축 전류보다 약간 높은 모습을 나타내고 있다.

표 1. 유도전동기 파라미터  
Table 1. Induction Motor Parameters

3상, 3.7[kW], 4극 rated line current 18.95A(peak), 1710[rpm]	
고정자저항	1.26[Ω]
회전자저항	0.21[Ω]
자화인덕턴스	50[mH]
고정자누설인덕턴스	4.7[mH]
회전자누설인덕턴스	4.7[mH]

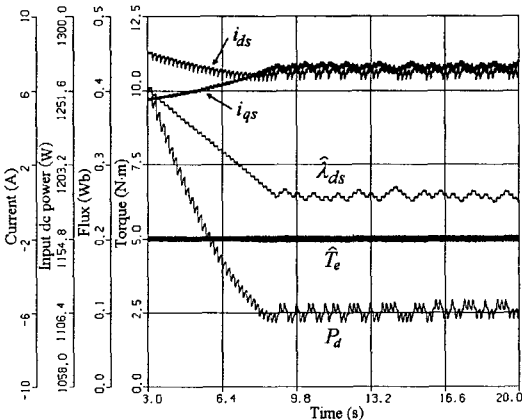


그림 3. 최대효율제어결과  
(1500[rpm], 부하 : 5(N·m))  
Fig. 3. Maximum efficiency control  
(1500[rpm], 5(N·m))

그림 4는 속도는 1500[rpm], 부하는 5[N·m]에서 13초에 10[N·m]로 증가시킨 경우의 기존방법에 의한 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다. 그림 4 (d)에서 13초에 부하토크  $T_l$ 은 10[N·m]로 증가되었지만 전동기토크  $T_e$ 가  $T_l$ 보다 작아서 속도가 1500[rpm]을 유지하지 못하고 그림 4 (e)에서와 같이 감소하고 있다. 이러한 이유는 토크제한은 자속의 영향을 받는데(식 (7)) 자속은 최대효율제어를 위

하여 값이 0.26[Wb]로 낮은 상태이고(그림 4 (b)) 부하 증가시 전동기토크도 증가하여야 하나 낮은 자속에 의한 낮은 토크제한으로  $i_{qs}$ 는 증가하지 못해서(그림 4 (a)) 토크가 증가하지 못하기 때문에 발생하는 현상이다. 그림 4 (a)에서  $i_{qs}$ 는 전류제한조건  $i_{q\_c}$ 가 아니라 토크제한조건  $i_{q\_t}$ 에 의해서 제한됨을 알 수 있다.

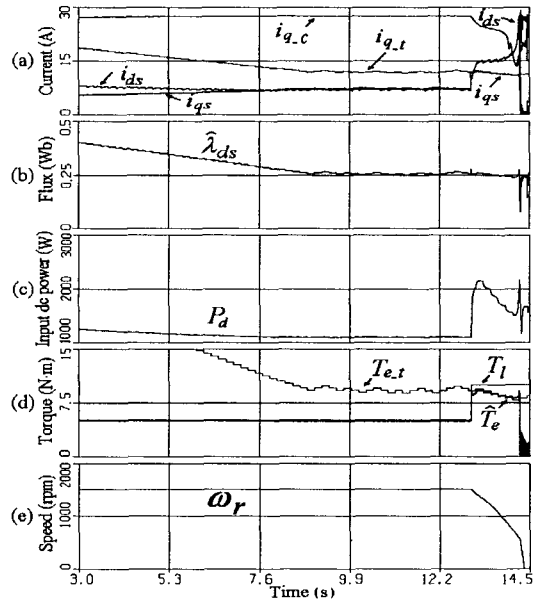


그림 4. 기존방법(1500[rpm], 부하 : 5→10(N·m))  
Fig. 4. Conventional maximum efficiency control

그림 5는 자속변화시 토크제한조건에 의한 최대토크를 나타내고 있다. 자속의 감소에 따라  $T_{e\_t}$ 가 급격히 감소함을 알 수 있다.

그림 6은 속도는 1500[rpm], 부하는 5[N·m]에서 12초에 10[N·m]로 증가시킨 경우의 제안한 방법에 의한 최대효율제어결과를 나타내고 있다. 그림 6 (f)는 시간축을 확대하여 q축 전류와 토크제한을 자세히 나타낸 것이다. 13초에 부하토크  $T_l$ 이 10[N·m]로 증가되어 q축 전류의 지령치  $i_q^*$ 가 증가하여 토크제한과 같아지면 제안한 방법에 의해서 자속의 지령치는 정격자속의 값으로 증가되고 토크제한이 증가되어서 q축 전류가 증가하여 토크가 증가하고(그림 6 (d)) 속도가 1500[rpm]을 유지하게(그림 6 (e)) 된다. 그림 6 (a)

에서 13초에 자속지령의 증가로 d축 전류가 순간적으로 증가하고 있는 모습을 나타내고 있으며, 그림 6 (b)에서 자속은 13초에 0.4[Wb]까지 증가했다가 감소해서 안정되고 있는 모습을 나타내고 있다.

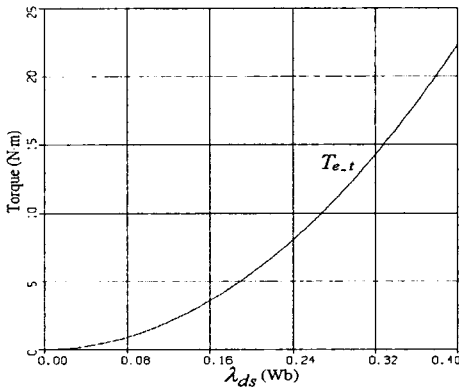


그림 5. 자속변환시 토크제한조건에 의한 최대토크  
Fig. 5. Maximum torque considering torque limit condition

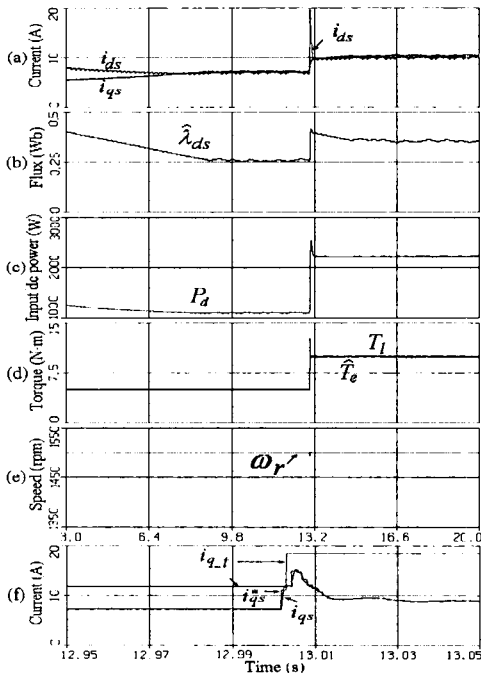


그림 6. 제안한 방법  
(1500(rpm), 부하 : 5→10[N·m])  
Fig. 6. Proposed maximum efficiency control

## 6. 실험결과

제안한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 TMS320C31을 사용한 인버터를 사용하여 실험하였다. DC링크전압  $V_{dc}$ 는 325[V]이며, 스위칭주파수는 4[kHz]이다. 전류제어는 125[ $\mu$ s], 속도제어 및 자속제어는 각각 1.25[ms] 주기로 수행했다. 모터의 회전속도는 1024[ppr] 엔코더를 사용해서 검출하였다. 입력  $P_d$ 는 125[ $\mu$ s]의 주기로 검출되었으며 저역통과필터(0.5/(s+0.5))를 통과시켜 사용하였고, 최대효율제어의 주기는 시행착오로 2.5s로 하였다.  $i_{qs}^*$ 와  $i_{q,t}$ 의 일치는 125[ $\mu$ s] 주기로 판단하였다. 사용한 모터는 표 1의 3상 유도전동기이다.

그림 7은 최대효율제어결과이다. 속도는 1000[rpm]이며, 입력은 약 875[W]에서 약 765[W]로 감소하고 있다. 자속은 정격자속 0.4[Wb]에서 약 0.25[Wb]로 감소한 모습을 나타내고 있다.

그림 8은 기존방법으로 제어한 결과이다. 부하토크를 5[N·m]에서 9.5[N·m]로 증가시켰을 때  $i_{qs}$ 는 토크제한조건  $i_{q,t}$ 에 의해서 제한되어서 부하토크에 대응하는 전동기토크를 발생시키지 못하고, 그 결과 속도제어가 안 되어 전동기속도가 감소해서  $P_d$ 가 급격히 감소하는 모습을 나타내고 있다.

그림 9는 제안한 방법으로 제어한 결과이다. 부하

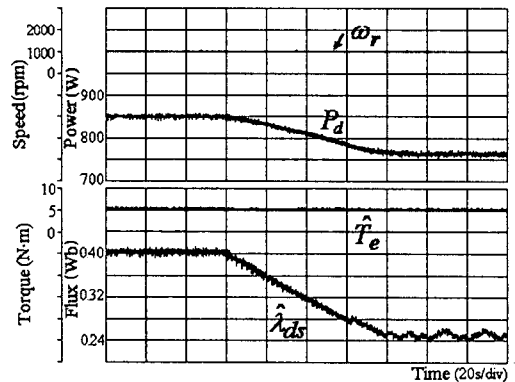


그림 7. 최대효율제어결과  
(1000(rpm), 부하 : 5[N·m])  
Fig. 7. Maximum efficiency control  
(1000(rpm), 5[N·m])

토크가  $5[N \cdot m]$ 에서  $9.5[N \cdot m]$ 로 증가해서  $i_{qs}$ 가  $i_{q,t}$ 와 일치하는 순간 자속의 값은  $\lambda_{dsn}$ 으로 증가하여  $i_{q,t}$ 가 증가하게 되며, 그 결과  $i_{qs}$ 가 순간적으로 증가하여 속도제어가 원활히 수행되며,  $P_d$ 가 약  $1810[W]$ 의 값에서 안정됨을 나타내고 있다.

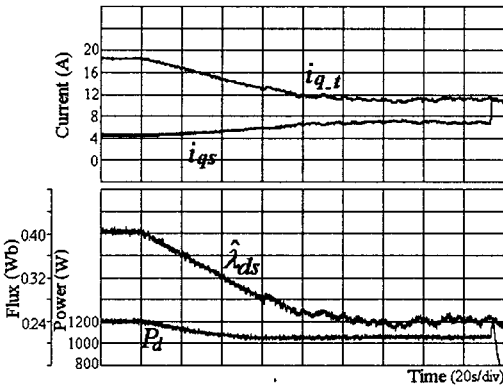


그림 8. 기존방법  
(1500(rpm), 부하 : 5→9.5(N·m))  
Fig. 8. Conventional method  
(1500(rpm), 5→9.5(N·m))

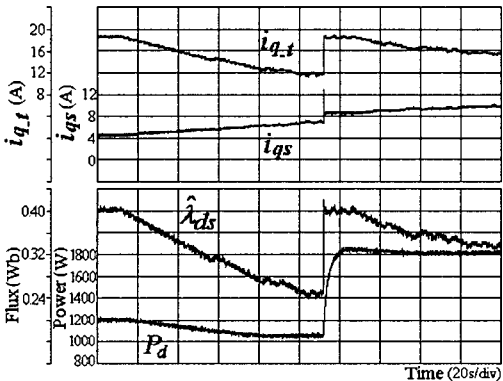


그림 9. 제안한 방법  
(1500(rpm), 부하 : 5→9.5(N·m))  
Fig. 9. Proposed method  
(1500(rpm), 5→9.5(N·m))

## 7. 결 론

유도전동기 고정자자속 기준제어의 최대효율제어 중 부하토크 증가 시 토크제한조건으로 증가된 부하 토크에 대응하는 토크를 전동기가 출력하지 못하여

토크제어가 안 되는 문제를 보인 후 해결방법을 제안하였다. 제안한 방법에서 갑작스런 부하의 증가에 의해서 토크제한과 q축 전류의 값이 일치하면 자속의 값을 정격자속의 값으로 증가시켜서 토크제한의 값이 증가되어 전동기토크가 증가됨을 시뮬레이션 및 실험결과를 통해서 입증하였다.

## 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 the Korean Institute of Illuminating and Electrical Engineers, 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 ◇

### 申明昊 (申明昊)

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