

유도전동기 고정자자속 기준제어의 최대효율제어

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

신명호*

(Myoung-Ho Shin)

요 약

입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 유도전동기 고정자자속기준제어의 최대효율제어방법을 제안한다. 제안한 방법에서, 정해진 자속의 값만큼씩 기준자속의 값을 변화시키면서 직류링크에서 측정된 입력의 값이 최소가 되는 기준자속의 값을 찾는다. 또한 철손저항을 고려한 유도전동기의 모델을 이용하여 철손저항을 고려한 토크, 슬립각 속도, 비간접 보상전류식을 사용한다. 시뮬레이션 및 실험결과를 통해서 제안한 방법의 효과를 입증한다.

Abstract

Maximum efficiency control scheme in a stator flux-oriented induction motor drive is proposed for minimizing input dc power. Flux level is decreased in steps for searching the minimum input dc power. In addition, Torque equation, slip angular frequency, and decoupling compensation current considering iron loss resistance is used. Simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

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]-[7].

유도전동기의 최대효율제어의 방법 중 직류링크에서 측정된 입력이 최소가 되는 d축 전류의 값을

찾는 방법에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. 이 방법은 전동기의 파라미터의 값을 몰라도 되는 장점을 가지고 있다.

고정자자속기준제어방법은 파라미터 변동에 대한 강인함의 장점을 가지고 있어서 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 입력이 최소가 되는 d축 전류의 값을 찾는 방법은 회전자자속기준제어에 주로 적용되었으며 고정자자속기준제어에 대해서는 거의 연구되지 못하였다.

1997년에 측정된 입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 방법을 제안한 고정자자속기준제어의 최대효율제어에 관한 논문이 발표되었다[8]. 이 논문에서 최대효율을 위한 기준자속을 뉴로-퍼지이론에 의해

* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 조교수

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

E-mail : mhshin@snut.ac.kr

접수일자 : 2006년 3월 3일

1차심사 : 2006년 3월 13일

심사완료 : 2006년 3월 23일

유도전동기 고정자자속 기준제어의 최대효율제어

서 찾는 방법을 제안하였다. 그러나 아직도 고정자 자속 기준제어의 최대효율제어에 관한 연구가 대단히 부족한 실정이다.

본 논문에서는 입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 고정자자속기준제어의 최대효율제어방법을 제안한다. 제안한 방법에서, 최대효율제어를 위하여 정해진 자속의 값만큼씩 기준자속의 값을 변화시키면서 직류링크에서 측정된 입력의 값이 최소가 되는 기준자속의 값을 찾는다. 또한 철손저항을 고려한 유도전동기의 모델을 이용하여 철손저항을 고려한 토크, 슬립각속도, 비간섭 보상전류식을 사용한다. 시뮬레이션 및 실험결과를 통하여 제안한 방법에 의해서 최대효율제어가 잘 이루어짐을 보인다.

2. 철손을 고려한 유도전동기 모델

그림 1은 정지 2상 좌표계에서 철손저항을 자화인덕턴스와 병렬로 연결된 등가저항으로 모델링하고, 속도 ω 로 회전하는 d-q 회전좌표계로 변환한 유도전동기의 등가회로를 나타낸다. 이 때 전압, 전류, 자속 및 토크방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

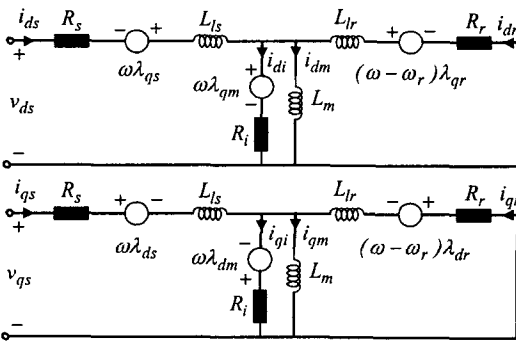


그림 1. 철손을 고려한 유도전동기 d-q 등가회로
Fig. 1. d-q equivalent circuit with iron-loss

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

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

$$0 = R_r i_{dr} + p\lambda_{dr} - (\omega - \omega_r)\lambda_{qr} \quad (3)$$

$$0 = R_r i_{qr} + p\lambda_{qr} + (\omega - \omega_r)\lambda_{dr} \quad (4)$$

$$R_i i_{di} = p\lambda_{dm} - \omega\lambda_{qm}, \quad R_i i_{qi} = p\lambda_{qm} + \omega\lambda_{dm} \quad (5)$$

$$i_{ds} + i_{dr} = i_{dm} + i_{di}, \quad i_{qs} + i_{qr} = i_{qm} + i_{qi} \quad (6)$$

$$\lambda_{ds} = \lambda_{dm} + L_{ls} i_{ds}, \quad \lambda_{qs} = \lambda_{qm} + L_{ls} i_{qs} \quad (7)$$

$$\lambda_{dr} = \lambda_{dm} + L_{lr} i_{dr}, \quad \lambda_{qr} = \lambda_{qm} + L_{lr} i_{qr} \quad (8)$$

$$\lambda_{dm} = L_m i_{dm}, \quad \lambda_{qm} = L_m i_{qm} \quad (9)$$

$$T_e = \frac{3P}{4} (\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr}) \quad (10)$$

여기서 R_i 는 등가철손저항이다.

한 제어주기 동안의 자속의 변동분은 매우 적으므로, 자속의 변화를 무시하면 d-q 동기좌표계에서 λ_{dm} 과 λ_{qm} 의 변동은 무시될 수 있고, 철손저항에 흐르는 전류는 식 (5)와 (7)을 정리하면 식 (11) 및 (12)와 같다.

$$\hat{i}_{di} \approx \frac{-\hat{\omega}_e \lambda_{qm}}{R_i} = \frac{-\hat{\omega}_e}{R_i} (\lambda_{qs} - L_{ls} i_{qs}) \quad (11)$$

$$\hat{i}_{qi} \approx \frac{\hat{\omega}_e \lambda_{dm}}{R_i} = \frac{\hat{\omega}_e}{R_i} (\lambda_{ds} - L_{ls} i_{ds}) \quad (12)$$

여기서 “ $\hat{}$ ”는 추정값을 나타낸다.

3. 고정자자속 기준제어

고정자자속의 추정은 α - β 정지좌표계에서 식 (13)과 같이 역기전력을 적분해서 구한다.

$$\lambda_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (13)$$

식 (13)을 순수적분기로 적분할 경우 포화 및 드리프트의 문제가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 programmable low pass filter[9]를 이용하여 고정자자속을 추정한다.

고정자자속의 각 \mathcal{D}_e 는 α - β 정지좌표계에서의 자속으로 나타내면 식 (14)와 같다. 정상상태에서의 슬립각속도는 식 (4)와 식 (6)~(9)를 정리하면 d-q 회전좌표계에서 식 (15)와 같이 된다. 동기각속도는 식 (16)과 같다.

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \frac{\lambda_{ds}}{\lambda_{qs}} \quad (14)$$

$$\hat{\omega}_{sl} = \frac{L_s i_{as} - L_m \hat{i}_{ai}}{\tau_r (\lambda_{ds} - \sigma L_s i_{ds}) + \frac{L_m}{R_r} L_m \hat{i}_{di}} \quad (15)$$

$$\hat{\omega}_e = \omega_r + \hat{\omega}_{sl} \quad (16)$$

식 (10)을 전류와 자속에 대해서 정리하고, 고정자 자속 기준제어에서 $\lambda_{as}=0$ 이 됨을 고려하면 철손저항을 고려한 토크방정식은 식 (17)이 된다.

$$\hat{T}_e = \frac{3P}{4} [\lambda_{ds}(i_{as} - \hat{i}_{qi}) - L_{ls}(\hat{i}_{di}i_{as} - \hat{i}_{qi}i_{ds})] \quad (17)$$

식 (4)와 식 (6)~(9)를 정리하고 $\lambda_{as}=0$ 을 고려하면 식 (18)을 얻는다. 식 (18)은 d축 자속이 q축 고정자전류와 철손전류에 의해 간섭받고 있음을 의미한다. 고정자자속을 이러한 간섭항으로부터 독립시켜 제어하기 위해 식 (18)에 식 (19)를 대입하면 (20)식의 비간섭 보상전류를 얻는다.

$$(1 + \tau_r p)\lambda_{ds} = (1 + \sigma \tau_r p)L_s i_{ds} - \sigma L_s \tau_r \omega_{sl} i_{as} - L_m i_{di} - \frac{L_m}{R_r} (pL_{lr} i_{di} - \omega_{sl} L_{lr} i_{qi}) \quad (18)$$

$$i_{ds}^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(\lambda_{ds}^* - \lambda_{ds}) + i_{dq} \quad (19)$$

$$i_{dq} = \sigma \tau_r \hat{\omega}_{sl} i_{as} + \frac{L_m}{L_s} (\hat{i}_{di} - \frac{\hat{\omega}_{sl} L_{lr} \hat{i}_{ai}}{R_r}) \quad (20)$$

고정자자속 기준제어에서 전동기토크는 안정된 제어를 위해서 식 (21)의 토크제한조건을 만족하여야 한다[10].

$$i_{as}^* \leq \frac{(1-\sigma)}{2\sigma L_s} \lambda_{ds}^* \quad (21)$$

그림 2는 제안한 벡터제어의 블록도를 나타낸다. 입력 P_d 는 직류링크에서 측정된 V_{dc} 와 I_{dc} 의 곱으로 계산한 후 평균치를 구해서 사용하나[4][6] 본 논문에서는 저역통과필터를 통과시킨 후 사용한다.

“Maximum Efficiency Control” 블록에서 P_d 를 최소로 하기 위한 기준자속을 출력한다. 자속제어기의 출력에 비간섭 보상전류 i_{dq} 가 더해져서 가 만들어지고 있는 모습을 나타내고 있다.

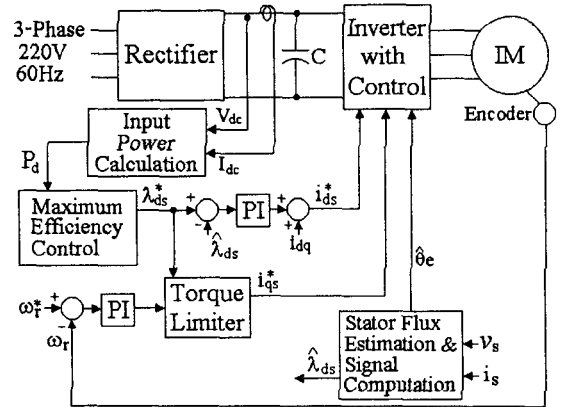


그림 2. 고정자 자속기준 벡터제어 블록도
Fig. 2. Stator flux-oriented control drive system

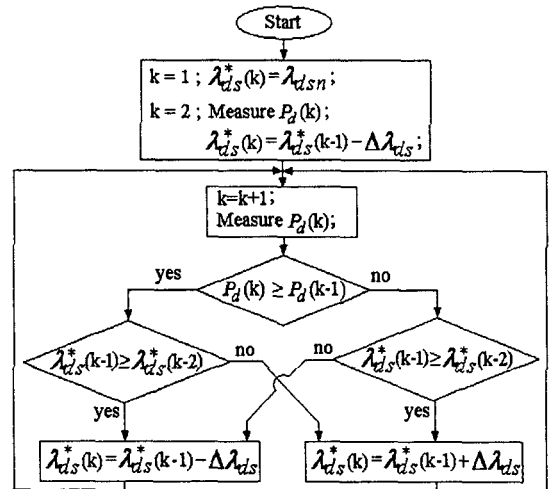


그림 3. 최대효율제어 흐름도
Fig. 3. Flow chart of maximum efficiency control

4. 최대효율제어

그림 3은 최대효율제어의 흐름도를 나타내고 있다. 초기상태($k=1$)에 기준자속은 정격자속(λ_{dsn})으로 한다. $P_d(k)$ 가 측정되어 이전단계에서의 값 $P_d(k-1)$ 과 비교되고 다음에 $\lambda_{ds}^*(k-1)$ 과

유도전동기 고정자자속 기준제어의 최대효율제어

$\lambda_{ds}^*(k-2)$ 를 비교하여 입력을 최소화시키기 위하여 $\lambda_{ds}^*(k)$ 를 $\Delta\lambda_{ds}$ 만큼 증가시킬지 또는 감소시킬지를 결정하여 $\lambda_{ds}^*(k) = \lambda_{ds}^*(k-1) + \Delta\lambda_{ds}$ 또는 $\lambda_{ds}^*(k) = \lambda_{ds}^*(k-1) - \Delta\lambda_{ds}$ 를 결정한다. 다시 설명하면, 자속을 증가시켰는데 입력이 감소하면 자속을 증가시키며, 입력이 증가하면 자속을 감소시킨다. 반대로, 자속을 감소시켰는데 입력이 감소하면 자속을 감소시키며, 입력이 증가하면 자속을 증가시킨다.

5. 시뮬레이션 결과

ACSL을 사용하여 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. 그림 3의 최대효율제어의 수행주기는 시행착오로 187.5[ms]로 하였다. 전동기는 표 1의 3상 3.7[kW]의 유도전동기를 사용하였다.

표 1. 3상 유도전동기 파라미터
Table 1. 3-phase Induction Motor Parameters

4극, line current 13.4A([rms]), 1710[rpm]	
고정자 저항	1.26[Ω]
회전자 저항	0.2[Ω]
자화 인덕턴스	50[mH]
고정자 누설 인덕턴스	4.7[mH]
회전자 누설 인덕턴스	4.7[mH]
철손저항	67[Ω]

그림 4는 자속의 변화에 따른 입력 P_d 를 나타내고 있다. 속도는 1200[rpm]이며 부하는 4[N·m]이다. 자속의 값이 약 0.25[Wb]에서 입력이 약 722[W]의 값으로 최소가 됨을 나타내고 있다.

그림 5는 1200[rpm], 부하 4[N·m]의 조건에서의 최대효율제어의 결과를 나타내고 있다. 자속은 0.4[Wb]의 초기값에서 시작하여 정상상태에서 약 0.24[Wb]가 되었으며, 이때 입력 P_d 는 그림 4의 최소치와 거의 같은 약 721[W]의 최소값이 되고 있음

을 나타내고 있다. 최대효율제어에 의해서 d축 전류는 감소하고, q축 전류는 증가하다가 정상상태에서 거의 같은 모습을 나타내고 있다.

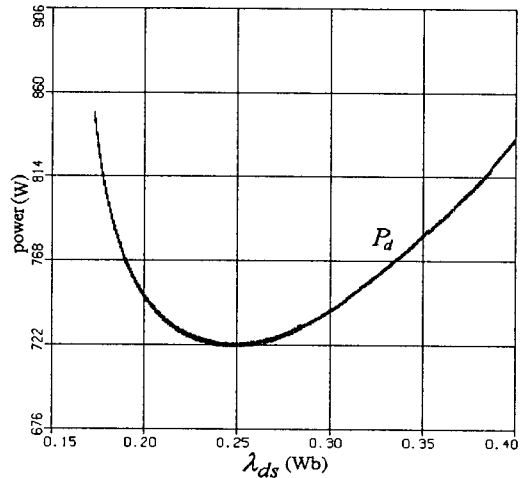


그림 4. 자속변화에 따른 P_d (1200(rpm), 부하 : 4(N·m))
Fig. 4. P_d according to flux(1200(rpm), 4(N·m))

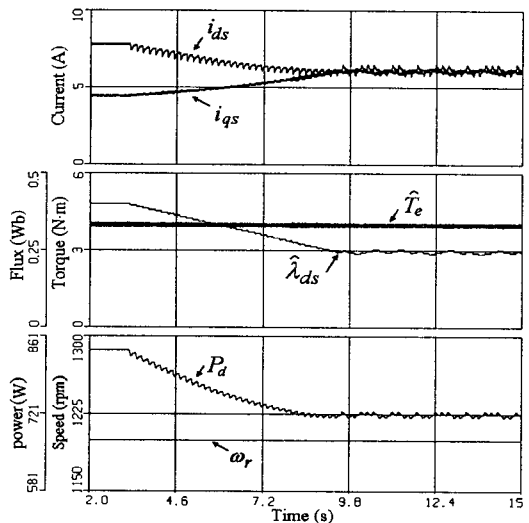


그림 5. 최대효율제어결과(1200(rpm), 부하 : 4(N·m))
Fig. 5. Result of maximum efficiency control (1200(rpm), 4(N·m))

그림 6은 속도 1200[rpm], 부하 7[N·m]의 조건으로 최대효율제어 중 부하를 10초에 4[N·m]로 감소시키고, 그 상태에서 운전 중 18초에 속도를 1200[rpm]에서 1700[rpm]으로 증가시킨 경우의 최

최대효율제어결과를 나타내고 있다. 부하변화와 속도 증가의 경우에 제한한 방법에 의해서 최대효율제어가 잘 수행되는 모습을 나타내고 있다.

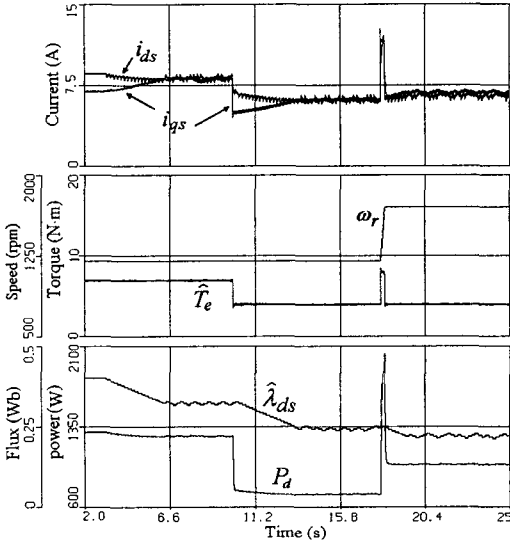


그림 6. 최대효율제어결과(7(N·m)→4(N·m), 1200(rpm)→1700(rpm))
 Fig. 6. Result of maximum efficiency control (7(N·m)→4(N·m), 1200(rpm)→1700(rpm))

6. 실험결과

TMS320C31을 사용한 인버터를 사용하여 실험하였다. 직류링크전압 V_{dc} 는 325[V]이며, 스위칭주파수는 4[kHz]이다. 전류제어는 125 [μ s], 속도제어 및 자속제어는 각각 1.25[ms] 주기로 수행했다. 모터의 회전속도는 1024[ppr] 엔코더를 사용해서 검출하였으며, 다이내모미터를 이용하여 부하를 인가하였다. $\Delta\lambda_{ds}$ 는 0.005[Wb]이다. 입력 P_d 는 125 [μ s]의 주기로 검출한 후, 저역통과필터(0.5/(s+0.5))를 통과시켜 사용하였고, 최대효율제어의 주기는 시행착오로 2.5s로 하였다. 사용한 모터는 표 1의 3상 유도전동기이다.

그림 7은 최대효율제어결과를 나타내고 있다. 속도는 1200[rpm]이며, 부하는 4[N·m]이다. 입력은 약 840[W]에서 약 710[W]로 감소하고 있으며, 자속은 정격자속 0.4[Wb]에서 약 0.25[Wb]로 감소한 모

습을 나타내고 있다. 속도는 일정한 모습을 나타내고 있다.

그림 7은 최대효율제어 중의 정역운전의 결과를 나타내고 있다. 부하는 5[N·m]이며 1500[rpm]에서 최대효율제어 중 -1500[rpm]으로 속도를 변경한 경우의 결과이다. 제어가 원활하게 수행되고 있는 모습을 나타내고 있다. 속도가 0[rpm]이 될 때 입력 P_d 는 저역통과필터의 영향으로 약간 감소했다가 다시 증가한 모습을 나타내고 있다.

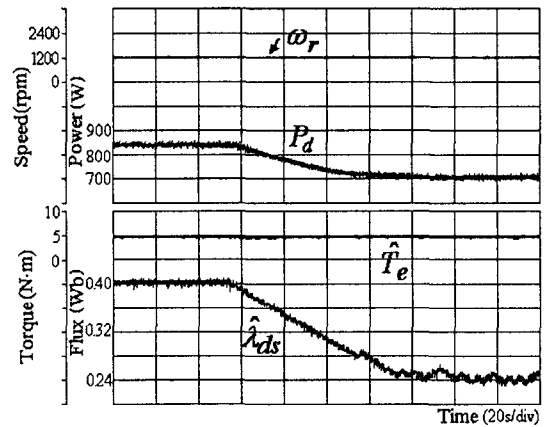


그림 7. 최대효율제어결과(1200(rpm), 4(N·m))
 Fig. 7. Result of maximum efficiency control (1200(rpm), 4(N·m))

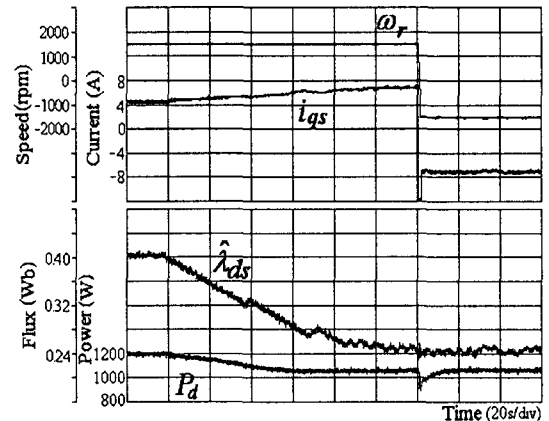


그림 8. 정역운전결과(1500(rpm)→-1500(rpm), 5(N·m))
 Fig. 8. Result of speed reversal (1500(rpm) → -1500(rpm), 5(N·m))

6. 결 론

본 논문에서는 입력이 최소가 되는 자속의 값을 찾는 고정자자속기준제어의 최대효율제어방법을 제안하였다. 최대효율제어를 위하여 정해진 자속의 값만큼씩 기준자속의 값을 변화시키면서 직류링크에서 측정된 입력의 값이 최소가 되도록 하였다. 또한 철손저항을 고려한 토크, 슬립각속도, 비간섭 보상전류식을 사용하였다. 시뮬레이션 및 실험결과를 통하여 제안한 방법에 의해서 최대효율제어가 원활하게 수행되었음을 보였다.

References

- [1] D. S. Kirschen, D. W. Novotny, and T. A. Lipo, "On-line efficiency optimization of a variable frequency induction motor drive," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol.21, pp.610-615, 1985.
- [2] S.-K. Sul and M.-H. Park, "A novel technique for optimal efficiency control of a current-source inverter-fed induction motor," IEEE Trans. on Power Electron., vol.3, pp.192-199, 1988.
- [3] J. C. Moreira, T. A. Lipo, and V. Blasko, "Simple efficiency maximizer for an adjustable frequency induction motor drive," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol.27, pp.940-946, 1991.
- [4] 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 Ind. Electron., vol.42, pp.192-198, 1995.
- [5] G.-K. Kim, I.-J. Ha, and M.-S. Ko, "Control of induction motors for both high dynamic performance and high power efficiency," IEEE Trans. on Ind. Electron., vol.39, pp.323-333, 1992.
- [6] C.-M. Ta and Y. Hori, "Convergence improvment of efficiency optimization control of induction motor drives," IEEE Trans. on Indus. Applicat., vol.37, pp.1746-1753, 2001.
- [7] C. Chakraborty and Y. Hori, "Fast efficiency optimization techniques for the indirect vector-controlled induction motor drives," IEEE Trans. on Indus. Applicat., vol.39, pp.1070-1076, 2003.
- [8] 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. Indus. Electron., vol. 44, no. 2, pp. 270-273, 1997.
- [9] 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. Power Electron., vol.12, pp.312-318, 2000.
- [10] 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 조교수.