論 文 14-6-5

2009 전력전자학술대회 우수추천논문

전압 부족 상태 시 유도 전동기 성능 개선

金慧承†, 金呈河*, 洪贊旭**, 金庚緖***

Performance Improvement of Induction Motor in Voltage Shortage State

Hye-Seung Kim, Jeong-Ha Kim, Chan-Ook Hong, and Kyung-Seo Kim

요 약

유도 전동기의 출력 토오크는 자속에 기준 하는 전류의 크기와 방향에 의해 제어되므로 전동기 구동 시스템에 의해 전류와 전압이 제한된 조건에서 고성능 토오크와 제어 시스템의 응답 특성을 향상시키기 위하여 벡터 제어 방식이 널리 이용되고 있다. 본 논문에서는 기존의 벡터 제어에 자속 제어기와 히스테리시스 제어기를 추가한 새로운 제어 방식을 제안하였다. 특히, 전압이 부족한 조건에서 과도시의 부하 응답 특성 및 안전성이 향상됨을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

ABSTRACT

The vector control algorithm has come to be used as induction motor for high performance torque and response improvement. This paper deals with new control algorithm which improves the performance of the rotor flux control by combining the conventional current controller with the flux controller and the hysteresis controller. In voltage shortage condition, proposed algorithm shows that the response and the stability can be improved both in the simulation results and in the experimental results.

Key Words : Induction motor, Vector control, Flux control, Hysteresis controller

1. 서 론

유도 전동기는 구조가 간단하고 신뢰성이 높으며 가격이 저렴하다는 등의 여러 가지 장점을 가지고 있어 산업용으로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 직류기나 동기기에 비교하여 제어 방식이 까다로운 편이며, 여러 파라미터를 매개로 하는 복잡한 비선형 시스템으로 표현되어 계산하기가 쉽지 않다. 또한, 유도 전동기의 고정자와 회전자 저항은 전동기 온도에 따라 변동이 쉽고 임의의 부하 변동에 의해 종종 불안정한 특성을 나타낸다.[1]-[3]

이러한 문제를 해결하고 고성능 운전을 위해서 공간상에서 토오크와 자속을 분리하여 제어하는 벡터 제어와 같은 기술이 유도 전동기 구동 시스템에 이용되고 있다. 간접 벡터 제어는 슬립 속도를 제어하여 자속과 토오크의 크기와 위치를 간접적으로 제어한다. 그러나 유도 전동기 출력 토오크는 구동 시스템에서 공급할 수 있는 최대 전압과 전류에 의해 제한되므로 적절한 전압, 전류 제어로 벡터 제어가 이루어지지 않으면 필요한 토크를 발생할 수 없으며 전류 제어 또한 불안정하여지게 된다.

본 논문에서는 이와 같이 전압이 제한된 조건에서 출력 토오크를 발생하기 위하여 d축 전류를 일정하게

†교신저자 : 정회원, LS산전 자동화 연구소 주임연구원
E-mail : sjkim3@lsis.biz
*정회원, 삼일엘텍㈜ 연구소 이사
**정회원, LS산전 자동화 연구소 수석연구원
***정회원, LS산전 자동화 연구소 상무연구위원
접수일자 : 2009. 8. 18 1차 심사 : 2009. 9. 22
2차 심사 : 2009. 10. 8 심사완료 : 2009. 10. 13

제어하는 기존의 벡터 제어 방식에 히스테리시스 제어기를 추가한 새로운 형태의 자속 제어기를 제안하여 응답 특성과 안정성을 향상시키고 이를 실험을 통하여 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 벡터 제어

유도 전동기의 단상 등가회로를 이용하여 dq축 전압 방정식을 도출하면 정지좌표계에서 식 (1), (2)과 같은 고정자와 회전자 방정식을 구할 수 있다.

$$V_s = R_s I_s + \frac{d}{dt}\lambda_s \tag{1}$$

$$0 = R_r I_r + \frac{d}{dt}\lambda_r \tag{2}$$

이 때, 회전자 자속은 아래 식과 같다.

$$\lambda_r = L_m I_s + L_r I_r \tag{3}$$

식 (3)을 회전자 전류에 관한 식으로 표현하고 식 (2)의 회전자 전압 방정식에 대입하면 벡터 제어에 필요한 회전자 자속을 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\lambda_r = \frac{R_r}{L_r} L_m I_s - \frac{R_r}{L_r}\lambda_r \tag{4}$$

그림 1의 페이서도와 같이 동기 좌표계에서 회전자 자속이 d축에만 존재하므로 q축의 회전자 자속 λ_{qr}은 항상 0이 된다. 따라서 식 (4)는 아래 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} - \frac{L_r}{R_r}\frac{d}{dt}\lambda_{dr} \tag{5}$$

이처럼 고정자 자속 전류 i_{ds}를 제어함으로써 회전자 자속 λ_{dr}의 크기를 제어할 수 있다. 유도 전동기의 고정자에 흐르는 전류는 회전자로 쇄교하는 자속을 만든다.

유도 전동기의 토오크는 회전자 자속과 직교하여 흐르는 고정자 전류로 계산되므로 회전자 자속을 일정하게 제어하면 식 (6)과 같이 토오크 전류 i_{qs}에 비례한다. 따라서 전압 제한 조건에서도 적절한 토오크 발생이 가능하도록 자속과 토오크 전류를 임의로 조정하는 것이 가능하다.

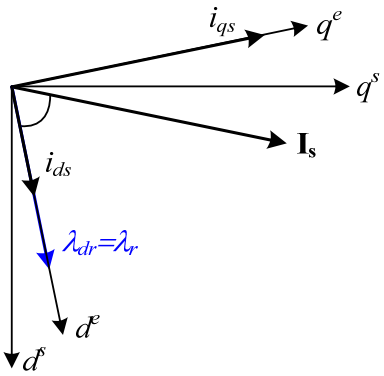


그림 1 벡터 제어 페이서도
Fig. 1 Phasor diagram of vector control

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\frac{L_m}{L_r}\lambda_{dr} i_{qs} \tag{6}$$

2.2 전압 제한 영역에서의 벡터 제어

유도 전동기의 벡터 제어를 위해서는 앞 절에서 언급한 바와 같이 회전자 자속 정보가 필요하다. 회전자 자속을 얻기 위하여 유도 전동기 전압, 전류 방정식 등을 주로 이용하지만, 회전자 자속이 전동기 정수에 민감하고 잡음의 영향으로 정확한 추정이 어렵다는 단점이 있다. 정격속도 부근의 과도상태 내지 정격속도 이상의 고속영역에서는 회전자 자속을 줄여줘야 하는데 현재 인버터 제어 출력 전압과 인버터가 출력할 수 있는 최대전압 간의 차이를 가지고 자속 전류를 제어하는 방식이 많이 사용된다.[4]

그림 2에 일정 자속 전류에 전압제어기를 부가한 기존의 자속 제어 구조를 보였다. V_{out}^*은 인버터에서 유도 전동기에 인가할 수 있는 최대전압이고 V_{out}은 인버터의 현재 출력전압이다.

$$V_{out}^* = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \cdot \eta \tag{7}$$

$$V_{out} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \tag{8}$$

여기서 η은 여유 계수이다.

두 전압간의 오차를 적분하여 출력된 값 K와 전동기 자속 전류 i_f와 곱하여 실제 전류 제어에 필요한 자속 지령전류 i_{ds}^*를 계산한다.[5] 그림 3에서 나타내듯이 인버터에서 공급되는 전압이 충분하면 지령 전압 V_{out}^*은 V_{out}보다 항상 크기 때문에 전압 제어기 출력 상수 K는 100%로 자속 지령전류 i_{ds}^*가 일정한 값을 유지한

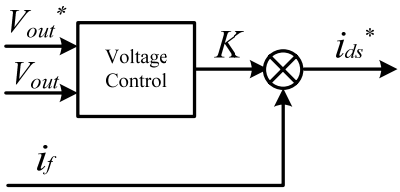


그림 2 기존 제어 블록도
Fig. 2 Block diagram of conventional control

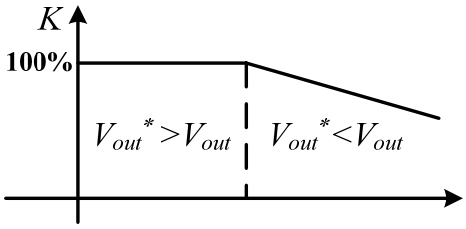


그림 3 출력 상수 K의 개념도
Fig. 3 Concept of output constant K

다. 그러나 정격속도 부근의 과도상태와 같이 제한된 전압에 의해 전압이 부족한 상황이 발생하면 전압 제어기가 동작함에 따라 K는 100%이하로 감소하면서 자속 전류의 지령값을 낮춘다. 인버터의 전류 제한 조건에 의해 전동기에 공급할 수 있는 최대 전류가 한정되므로 자속 전류가 감소되는 만큼 토오크 전류를 증가시켜야 출력 토오크를 유지할 수 있다.

2.3 전압 제한 영역에서의 벡터 제어

앞 절에서 논의하였듯이 전압을 이용하여 자속 전류를 제어하는 방법은 구현이 간단하다는 장점이 있지만 과도 상태에서 응답성이 늦고, 전압이 제한된 조건에서 종종 전압 제어기가 민감하게 동작하여 자속 지령 전류의 변동이 지나치게 빨라지는 단점이 있다. 이는 지령 전류의 리플로써 나타나며 전체 벡터 제어 시스템이 불안정해지는 원인이 된다. 특히 엘리베이터와 같은 승강 부하의 경우 진동과 소음을 유발하여 제품의 신뢰도를 떨어뜨리기도 한다. 이를 보완하기 위하여 그림 2의 기존의 제어 방식에 그림 4와 같이 자속 제어기를 추가하였다. 이를 통하여 간접적으로 자속을 제어하는 대신 직접 자속 제어가 수행됨으로써 과도 상태에서도 적절한 자속 계산이 이루어져 전체 시스템의 응답성이 향상되게 된다. 슬립속도 계산에도 식 (9)와 같이 계산된 자속을 직접 반영하여 응답성을 높였다.

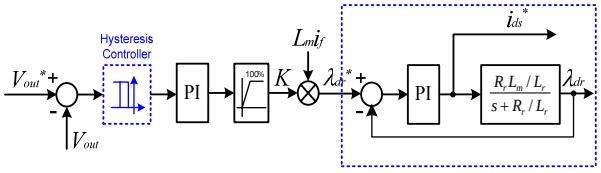


그림 4 제안하는 제어 블록도
Fig. 4 Block diagram of proposed control

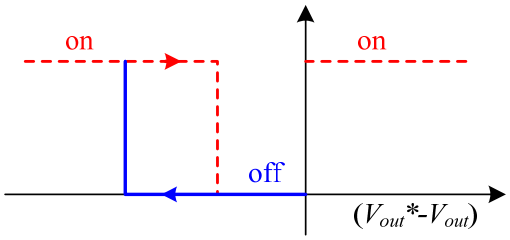


그림 5 히스테리시스 제어기 동작 특성
Fig. 5 Operation of hysteresis controller

$$\omega_{sl} = \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{i_{qs}}{\lambda_{dr}} \tag{9}$$

또한 그림 4와 같이 전압 오차에 따라 일정 기준 조건에서만 동작하는 히스테리시스 제어기를 추가하였다. 히스테리시스 제어기는 그림 5와 같이 전압 오차의 변동 크기와 방향에 따라 K의 계산 여부를 결정하므로 전압 제어기 출력 상수 K의 민감도를 낮출 수 있다. 식 (10)처럼 지령 자속이 출력 상수 K와 비례하므로, 결과적으로 지령 전류의 변동 정도가 줄어듦으로써 전류 제어의 안정성이 높아져 전체 시스템의 효율성을 향상시킨다.

$$\lambda_{dr}^* = K \cdot L_m i_f \tag{10}$$

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

이 절에서는 정격속도, 정격부하 조건하에서의 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 이용하여 기존 방식과의 비교를 통하여 제안하는 방식의 타당성을 검증한다. 본 논문에서는 표 1과 같은 사양의 7.5[kW]의 유도 전동기를 이용하였다. 실험은 같은 용량의 두 대의 유도 전동기를 맞물려 부하 세트를 구성하였다. 정격 속도로 운전시 100% 정격부하를 스텝으로 인가하고 이때의 전류와 속도 파형을 관찰하였다.

표 1 유도 전동기 정수
Table 1 Parameters of Induction Motor

Power[kW]	7.5	Pole	4
$V_{rated}[V_{rms}]$	380	Rs[Ω]	0.568
$I_{rated}[A_{rms}]$	15.1	Ls[mH]	92.75
$I_{noload}[A_{rms}]$	6.5	σLs[mH]	8.04
$Speed_{rated}[rpm]$	1800	Tr[ms]	248

3.1 시뮬레이션

그림 6과 7은 유도 전동기를 정격속도까지 기동 시 과도상태를 나타내는 시뮬레이션 파형이다. 기동하여 정격 속도에 도달하는 순간 전류 제어 출력 전압은 인버터가 출력할 수 있는 전압을 초과함에 따라 자속 지령 전류는 전동기 정격 전류의 약 35%로 감소한다. 이 때, 그림 6의 기존 제어 방식은 전류가 흔들리며 불안정한 전류 제어 특성을 보이지만 그림 7의 제안하는 제어 방식은 안정적으로 전류 제어가 이루어지며 특히 정상 상태에서 응답성이 약 2배 빨라짐을 확인할 수 있다.

3.2 실험 결과

그림 8의 실험 파형은 인버터에서 공급되는 전압이 제한되는 조건에서 출력 상수 K[50%/div.], 지령 자속[0.5wb/div.], 추정 자속[0.5wb/div.], d축 지령 전류[5A/div.]의 변화를 나타낸다. 전압이 부족해지면 전압 제어기의 동작으로 제어기 출력 상수 K가 감소하고 K와 비례하는 지령 자속도 감소한다. 자속 제어기의 동작으로 추정 자속도 함께 감소되면서 d축 지령 전류도 감소하고 q축 전류를 증가함으로써 적절하게 토오크를 유지할 수 있게 된다. 그림 9는 전압이 부족한 상황에서 제어기 출력 상수 K[40%/div.]의 동작 파형을 나타낸다. 그림 9(a)의 기존 제어 방식에서는 출력 상수 K는 리플을 가진 형태로 변동함을 보여준다. 이에 반해 그림 9(b)의 제안된 제어 방식은 출력 상수 K가 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

그림 10의 실험 파형은 정격 속도에서 정격 부하 온/오프 시 각각의 전동기 속도[500rpm/div.], d축 지령전류[5A/div.]와 실제 전류[5A/div.], q축 전류[15A/div.]를 나타낸다. 그림 10의 왼쪽 파형은 기존 전류 제어기를 나타낸 것이고 오른쪽 파형은 제안하는

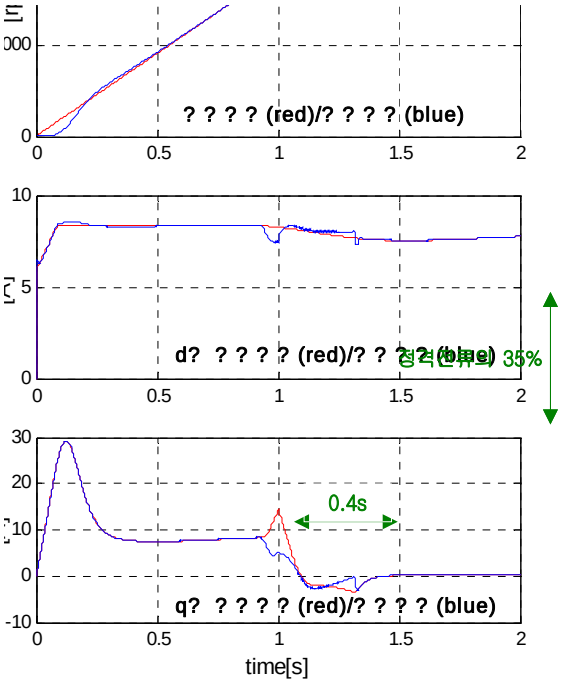


그림 6 기동 시 출력 파형(기존 방식)
Fig. 6 Waveforms at start(Conventional method)

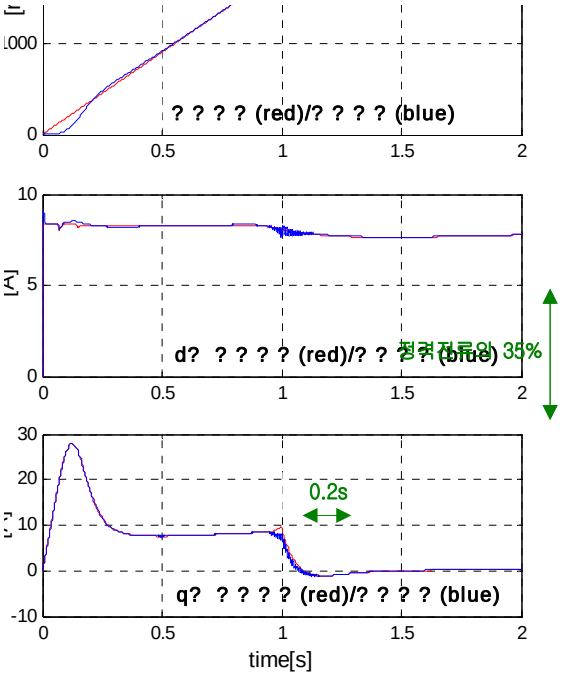
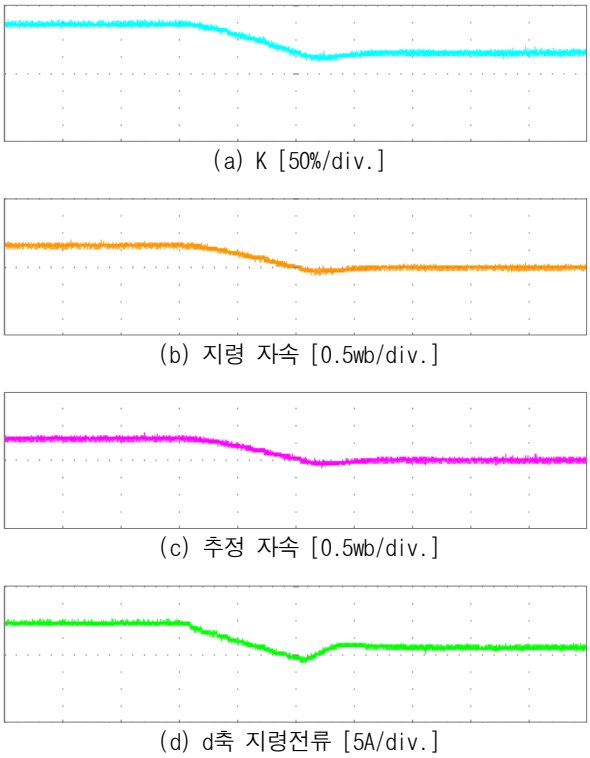


그림 7 기동 시 출력 파형(제안 방식)
Fig. 7 Waveforms at start(Proposed method)



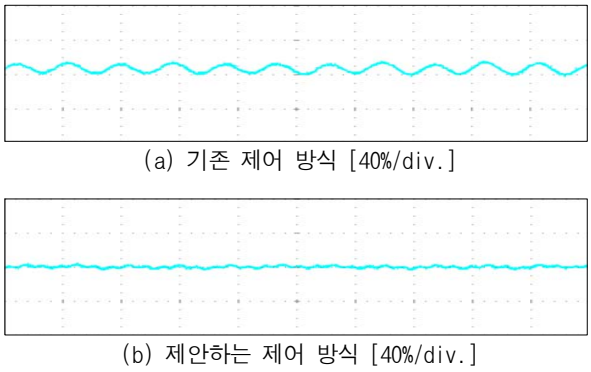
(a) K [50%/div.]

(b) 지령 자속 [0.5wb/div.]

(c) 추정 자속 [0.5wb/div.]

(d) d축 지령전류 [5A/div.]

그림 8 인버터 전압제한시 출력상수의 변화 [500ms/div.]
Fig. 8 Variation of output constant in voltage shortage



(a) 기존 제어 방식 [40%/div.]

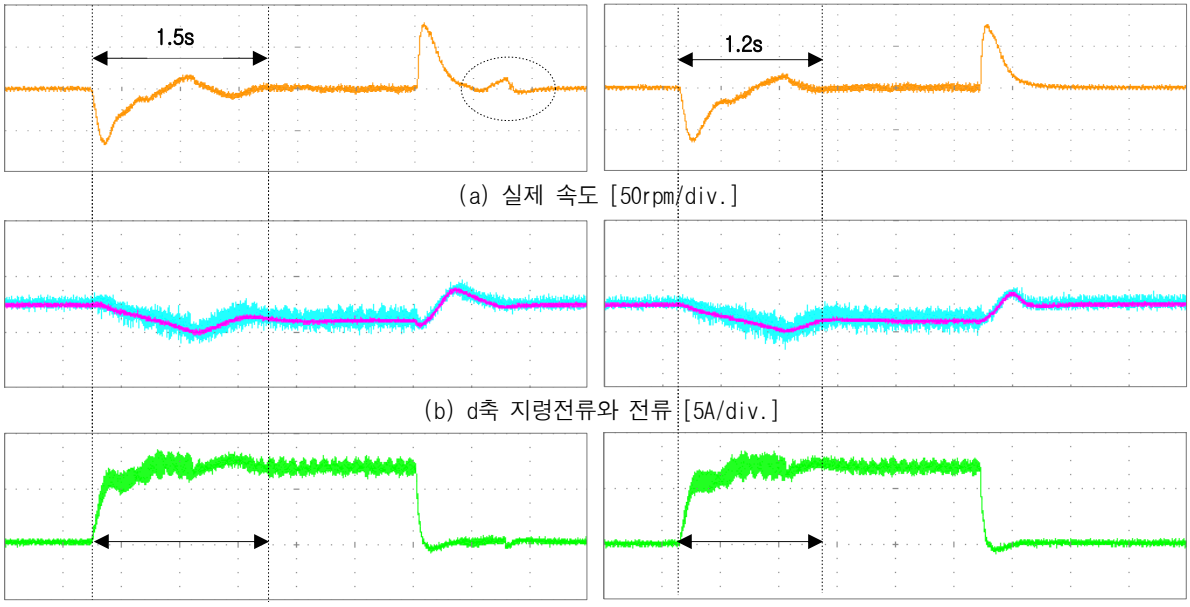
(b) 제안하는 제어 방식 [40%/div.]

그림 9 전압 제어 출력 상수 K 비교 [500ms/div.]
Fig. 9 Comparison of voltage controller constant K

히스테리시스 제어기이다. 두 그림을 비교해보면 부하가 인가되는 순간 히스테리시스 제어기의 경우 전류가 더 빨리 안정적으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한, 부하가 오프 되는 순간 기존 전류 제어기의 전류와 속도 변동 정도에 비하여 제안하는 히스테리시스 제어기의 경우가 더 안정적으로 제어됨을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

유도 전동기의 입력 전압과 전류는 인버터의 dc링크 전압과 전류 정격에 의해 제한된다. 다시 말해, 전동기



(a) 실제 속도 [50rpm/div.]

(b) d축 지령전류와 전류 [5A/div.]

(c) q축 전류 [15A/div.]

그림 10 스텝 부하 시 실험 파형[500ms/div.]
Fig. 10 Experimental waveforms at step load

구동 시스템에 의해 필요한 토크를 출력하기 위한 전압과 전류가 제한된다. 그러므로 이러한 제한 조건에서 출력 토크를 발생하기 위한 여러 가지 제어방식 중 본 논문에서는 전압 제한 조건에서 특히 과도 상태를 위한 벡터 제어의 전류와 토크 특성을 개선하는 방식을 제안하였다. 기존의 일정 전류 제어 방식은 전압 제한 조건에서 응답 특성이 느려 소음과 진동 유발의 원인이 되고 민감한 전압 제어기로 인해 시스템의 불안정성의 원인이 된다. 본 논문에서 제안하는 방식은 과도 상태 시에도 안정된 제어가 가능하도록 자속 제어기와 히스테리시스 제어기를 도입하여 기존 일정 전류 제어 방식이 가진 느린 응답 특성과 불안정한 과도 특성 문제를 해결하였다. 이를 검증하기 위해 정격 속도, 정격 부하 실험을 통해 히스테리시스 제어기가 안정적으로 동작함을 전류와 속도 파형으로 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] A. Mezouar, M. K. Fellah, S. Hadjeri, O. Touchami, Y. Sahali, "Robust Direct Field Oriented Control of Induction Motors Using Adaptive Observer", *Industrial Electronics*, 2006 IEEE International Symposium on, Vol. 3, pp. 2297-2302, 2006, July.

[2] Mohamed M. M. Negm, "Speed Control of a Three-Phase Induction Motor Based on Robust Optimal Preview Control Theory", *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 21, No. 1, pp. 77-84, 2006, March.

[3] Casadei, D., Serra, G., Tani, A., Zarri, L., "A Robust Method for Field Weakening Operation of Induction Motor Drives with Maximum Torque Capability", *Industry Applications Conference*, Vol. 1, pp. 111-117, 2006, Oct.

[4] M.H. Shin, D.S. Hyun, S.B. Cho, "Maximum torque control of stator flux-oriented of induction machine drive in the field-weakening region", *IEEE Trans. on Ind. App.*, Vol. 38, No.1, 2002, Jan/Feb.

[5] Sang-Hoon Kim, Seung-Ki Sul, "Voltage control strategy for maximum torque operation of an induction machine in the field weakening region", IECON of IEEE, Vol. 1, pp. 599-604, 1994, Sept.

저 자 소 개

김혜승(金慧承)

1979년 7월 20일생. 2003년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 LS산전 자동화 연구소 주임연구원.

김정하(金呈河)

1961년 6월 19일생. 1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1995년-1996년 일본 동경대 종합시험소 공동 연구원. 1999년 일본 明治대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년-2009년 5월 LS산전 자동화연구소 수석연구원. 2009년 6월~현재 삼일엘텍㈜ 연구소 이사.

홍찬욱(洪贊旭)

1969년 3월 31일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년~현재 LS산전 자동화 연구소 수석연구원.

김경서(金庚緖)

1957년 12월 5일생. 1982년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 졸업(석사). 1990년 동 대학원 졸업(공박). 1991년-1992년 Univ. of Tennessee (Post Doc.). 1984년~현재 LS산전 자동화 연구소 상무연구위원. 당 학회 감사.