

## 유도전동기 직접벡터제어를 위한 회전자 시정수 추정

배상준\* · 최종우 · 김흥근 · 이흥희 · 전태원  
 경북대학교 · 울산대학교

### Rotor Time Constant Estimation for Induction Motor Direct Vector Control

Sang-Jun Bae · Jong-Woo Choi · Heung-Geun Kim · Hong-Hee Lee · Tae-Won Chun  
 Kyung pook Nat Uni · Ulsan Uni

#### ABSTRACT

The proposed rotor time constant estimation method can be applied to the direct vector control system of induction motor with flux observer. In this paper the flux observer proposed by Gopinath model are used. This paper presents a new scheme for on-line estimation of rotor time constant using estimated rotor flux phase and current model rotor flux phase.

The major advantage of this method are its dynamic correction capability, simplicity and accuracy as well as independence from change in motor parameter. simulation results are presented which demonstrate the effectiveness of the on line rotor time constant estimation.

#### 1. 서론

벡터제어는 유도전동기의 순시토크를 제어하기 위해 전압과 전류의 크기뿐만 아니라 위상까지 제어하는 것으로 그동안 이에 관한 수많은 연구가 진행되어 왔다. 직접 벡터제어는 전동기의 기준 자속 각을 찾아내기 위해서, 실제 전동기의 내부에 센서를 설치하여 자속을 직접 측정하거나 전압, 전류 등을 이용하여 자속을 추정하는데 자속센서를 이용한 자속 측정 방법은 센서의 기계적인 강인성이 떨어지고, 부가적인 제품의 원가상승의 원인이 되기 때문에 기준 자속을 순시적으로 추정하는 자속추정기가 오랫동안 연구의 대상이 되어 왔다. 회전자 자속의 정확한 동정이 필수적인데, 이 회전자 자속은 제어 알고리즘에 따라 약간의 차이는 있지만 전동기 상수의 영향을 받는다<sup>[1-6]</sup>.

대표적인 자속추정기로는 전류 모델 추정기<sup>[7]</sup>와 전압 모델 추정기<sup>[8]</sup>가 있으며, 이 두가지 모델을 적절히 혼용하여 사용하는 방법이 제안되었으며<sup>[8,9]</sup>, 전기적인 유도

전동기 모델로부터 유도전동기 상태방정식을 유도하고, 적절한 추정기 이득값을 선택함으로써 자속을 추정하는 전차원, 최소차원 추정기 등이 있다<sup>[10]</sup>.

전류모델 추정기를 사용하는 경우 전류모델의 전동기 상수에 대해 매우 민감하기 때문에 저속과 고속을 포함한 전 속도 영역에서 좋은 특성을 얻을 수 없다. 전압모델을 사용하는 경우는 역기전력이 작은 저속영역에서는 고정자 임피던스 강하 및 잡음의 영향으로 추정값이 정확하지 않고, 또한 적분시 측정 변수들의 옷셋 때문에 적분기가 포화되기 쉽다. 그리고 전류모델과 전압모델을 혼용한 고퍼나스 모델은 전압모델의 옷셋문제에 강인하고, 전동기 상수 오차에 강인한 반면 고속영역에서도 전류모델의 영향을 받아 전동기 상수 변화에 따른 자속 추정 오차를 수반한다. 기본적인 유도전동기의 전기적 모델식으로부터 유도된 상태방정식을 이용하는 자속추정기에 있어서, 고속 영역에서는 비교적 정확한 자속의 추정이 가능하다. 그러나 이런 방법들 역시 전동기 상수 오차와 변동에 영향을 받게 되고, PWM 인버터로 구동되는 시스템에서 데드타임이나 영전류 클램핑 현상<sup>[11]</sup> 등에 의해 전압 왜곡 현상등의 제약 조건 때문에 저속에서의 운전에 한계를 가진다. 전차원 관측기 및 확장형 칼만필터 등은 복잡한 수식과 알고리즘으로 인하여 구현이 쉽지 않다.

본 연구에서는 전류모델과 전압모델을 혼용한 고퍼나스 자속추정기를 사용하여 자속을 추정할 경우, 전류모델의 회전자 시정수의 변화에 의해 고속영역에서의 자속 추정오차의 문제점을 살펴보고, 전류모델의 회전자시정수를 실시간으로 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

고퍼나스 자속추정기에 의해 추정된 회전자 자속의 위상과 전류모델의 회전자 자속의 위상의 차이를 MRAS(Model Reference Adaptive System)<sup>[12]</sup> 방법을 적용하여 전류모델의 회전자 시정수를 추정하였다. 이러한 방법은 기존의 직접벡터 제어 알고리즘에 하드웨어의 추가나 수정 없이 PI제어기 알고리즘만을 추가함으로써 적용할 수 있다.

본 논문에서는 제안한 방식을 시뮬레이션과 실험을 통하여 고속운전영역에서 보다 정확히 자속을 추정하고 전동기 상수 오차에 강인함을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 회전자 자속 기준 직접벡터제어

공간상에서의 기준 자속의 위치는 측정 또는 계산에 의해 얻을 수 있고 얻어진 자속각의 위치에 따라 고정자 전류를 자속각과 일치하는 성분과 그와 직교하는 성분으로 분해하여 그 크기를 각각 제어함으로써 순시 토크와 자속을 제어할 수 있다. 이와 같이 자속관측기에서 자속의 위치를 직접 얻은 후 이를 통하여 제어하는 방법을 직접 벡터제어(Direct Vector Control)라고 한다.

#### 2.1.1 고프나스 모델의 자속관측기

회전자 전압방정식을 회전자 자속과 고정자 전류로 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{L_r}{L_m} \left( \frac{1}{s} (\mathbf{v}_s^s - r_s \mathbf{i}_s^s) - \sigma L_s \mathbf{i}_s^s \right) \quad (13)$$

$$p \lambda_r^s = - \left( \frac{R_r}{L_r} - j\omega_r \right) \lambda_r^s + R_r \frac{L_m}{L_r} \mathbf{i}_s^s \quad (14)$$

전류모델에서 구한  $\lambda_r^s$  를  $\lambda_{r\_cm}^s$  이라고 정의하고 식(13)과 식(14)을 이용하여 고프나스 모델의 자속관측기를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{r\_vm}^s + \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{r\_cm}^s \quad (15)$$

식(15)은 전압모델에 고주파 통과필터가, 전류모델에는 저주파통과필터와 대역 통과필터가 곁해진 형태로 볼 수 있으며 전류모델에서 전압모델로 전이되는 주파수를 필터의 차단각주파수로 해석하여 PI제어기의 이득을 2차 버터워스 필터의 개념에서 설계하면,  $K_p = \sqrt{2}\omega_c$ ,  $K_i = \omega_c^2$  이다.

#### 2.1.2 위상보상을 이용한 자속관측기<sup>[13]</sup>

자속관측기에서 만약 전동기 제정수 특히 회전자 저항,  $r_r$  과 여자 인덕턴스,  $L_m$  에 오차가 있을 경우 두 모

델이 전이되는  $\omega_c$  (rad/sec) 부근에서의 오차가 전압 모델 또는 전류 모델 단독의 경우보다 나빠지는 경우가 생기게 되고 이로 인해 자속 관측 특성이 나빠지게 된다. 이러한 현상은 전압, 전류 모델의 위상 변화를 적절히 보상함으로써 개선될 수 있다.

위상 보상 함수  $e^{-j\alpha}$  의  $\alpha$  는 식(16)과 같이 주어진다.

$$\alpha = \left[ \pi - \tan^{-1} \left[ \frac{K_p \omega_c}{K_i - \omega_c^2} \right] \right] \quad (16)$$

이상과 같은 자속 추정기를 이용하면  $r_r, L_m$  의 오차에도 불구하고 전 속도영역에서 비교적 강인한 추정 특성을 얻을 수 있다.

### 2.2 제안한 방식의 회전자 시정수 추정 방법

제안된 회전자 시정수 보상방법은 고프나스 모델 자속관측기를 바탕으로 하여 추정된 회전자 자속의 위상과 전류모델 자속관측기의 위상이 같아지도록 MRAS(Model Reference Adaptive System)를 적용한 방식으로 제어하여 전동기의 중/고속 운전 시 전동기 회전자시정수의 변동에 따른 전류모델의 영향을 최소화하여 중/고속 운전 시 에도 뛰어난 제어성능을 나타내도록 회전자 시정수를 보상하는 제어방식이다.

#### 2.2.1 제안한 방법

고프나스모델 자속관측기에서 추정된 자속을 전압모델 및 전류모델로 구해진 회전자 자속으로 표현하면 (4-1) 과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\lambda_r^s = \frac{s^2}{s^2 + a s + b} \lambda_{r\_vm}^s + \frac{a s + b}{s^2 + a s + b} \lambda_{r\_cm}^s \quad (17)$$

각각의 추정된 회전자 자속의 위상을 나타내게 되면 식(18)~(20)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\hat{\theta}_c = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{qr}^s}{\hat{\lambda}_{dr}^s} \right) \quad (18)$$

$$\hat{\theta}_{vm} = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{qr\_vm}^s}{\hat{\lambda}_{dr\_vm}^s} \right) \quad (19)$$

$$\hat{\theta}_{cm} = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{qr\_cm}^s}{\hat{\lambda}_{dr\_cm}^s} \right) \quad (20)$$

식 (17)을 회전자 자속의 위상으로 다시 표현하면 식

(21)과 같아진다.

$$\hat{\theta}_e = \frac{S^2}{S^2 + aS + b} \hat{\theta}_{vm} + \frac{aS + b}{S^2 + aS + b} \hat{\theta}_{cm} \quad (21)$$

식 (21)을 이용하여 제어기의 입력신호로 사용 될 오차 신호를 만들어 주기 위해 양변을 전류모델 자속의 위상으로 빼주게 되면 식 (22) 과 같아지게 된다.

$$\hat{\theta}_e - \hat{\theta}_{cm} = \frac{S^2}{S^2 + aS + b} (\hat{\theta}_{vm} - \hat{\theta}_{cm}) \quad (22)$$

식 (22)에서 추정된 회전자 자속의 위상과 전류모델 자속관측기의 회전자 자속위상의 오차신호가 "0" 이 되게 제어를 할 수 있으면 전압모델 자속관측기의 회전자 자속 위상과 전류모델 회전자 자속 관측기의 위상이 같아지게 된다. 이 오차신호를 모델 기준 적응 시스템 (MRAS)를 적용하여 전류모델 자속관측기의 회전자 시정수를 보상 할 수 있다면 전동기의 중/고속 영역에서 전동기 상수 변화에 강인한 벡터제어를 할 수가 있다

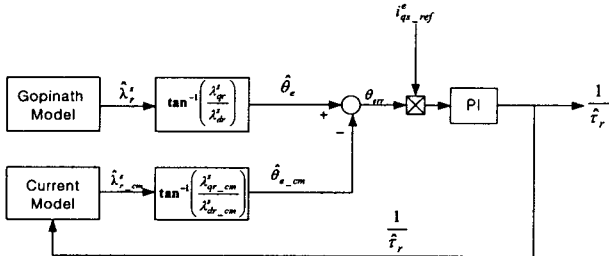


그림 1. 회전자 시정수 추정시스템의 구조

Fig.1. Structure of estimation rotor time constant

전동기의 정/역 운전시 오차신호의 부호를 판별하기 위해  $i_{qs}^e$ 를 오차신호와 곱하여 PI제어기의 입력신호로 사용하였다.

### 2.3 시뮬레이션

#### 2.3.1 시스템구성

그림 2는 유도전동기 직접벡터 제어시스템의 블록도이다. 유도전동기의 직접벡터제어시스템의 구조에 회전자시정수를 추정하는 PI제어기만 추가된 형태이므로 기존의 직접벡터제어시스템의 구조를 그대로 사용할 수 있다. 시뮬레이션 및 실험 모두 동일한 제어구조를 사용하였다.

전류제어기는 10kHz, 속도제어기와 자속제어기는 1kHz로 구성하였다.전류제어기의 출력은 최소거리 과변조기법을 이용하여 제한하였다.

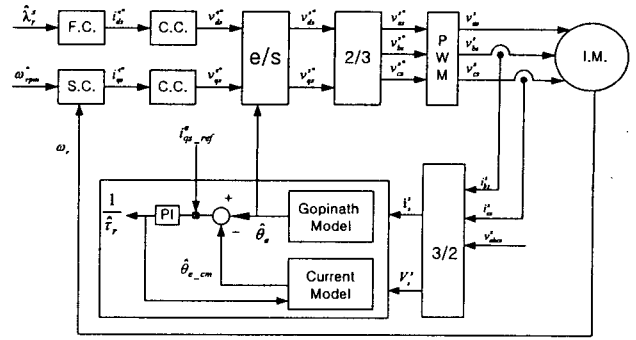


그림 2 제어시스템 블록도

Fig.2. Block diagram of Control System

표 1. 유도전동기 정격 및 상수

Table 1. Induction motor rates and parameters

정격출력	3.7 [kW]	$r_s$	0.75 [ $\Omega$ ]
정격전압	220 [V]	$r_r$	0.45 [ $\Omega$ ]
정격전류	13.5 [A]	$L_s$	74.33 [mH]
극수	4	$L_r$	74.33 [mH]
정격주파수	60 [Hz]	$L_m$	72.62 [mH]
정격속도	1730 [rpm]	$J$	0.06[kg · m <sup>2</sup> ]

시뮬레이션은 고속영역, 중/고속영역, 정/역 운전영역, 역 운전 영역으로 구분하여 실시하였으며 모두 무 부하 상태에서 실시하였다.

#### 2.3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 9 ~ 그림 15 은 제안된 방식을 적용하여 각각의 과도응답 특성과 전류모델 자속관측기의 회전자 시정수의 추정특성을 보여주고 있다. 전동기 상수 변화에 강인하다는 것을 증명하기 위해  $L_m$ ,  $R_r$ 에 각각 20%의 오차를 두고 시뮬레이션을 실시 하였다. 회전자 자속 위상은 각각 추정된 회전자 자속 위상과 전류모델 회전자 자속위상을 보여주고 있다. 추정된 회전자 자속 위상과 전류모델 회전자 자속 위상이 같아지는 시점에서 역 회전자 시정수가 실제 값에 추정되고 있는 것을 알수 있다. 그림 9와 그림 13은 0rpm → 1500rpm으로 속도지령을 인가하였을 경우 전류 와 토크응답 및 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정특성을 보여주고 있다. 그림 10과 그림 14는 800rpm → 1500rpm으로 속도지령을 인가하였을 경우 전류 와 토크응답 및 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정특성을 보여주고 있다. 그림 11과 그림 15는 1500rpm → -500rpm으로 정/역으로 속도지령을 인가하였을 경우 전류 와 토크응답 및 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정특성을 보여주고 있다. 그림 12와

그림 15는 0rpm → -1000rpm 으로 속도 지령을 인가하였을 경우 전류 와 토크응답 및 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정특성을 보여주고 있다.

제안된 방식으로 고퍼나스 자속 관측기를 이용한 직접벡터를 사용하였을 경우 고속 영역에서도 회전자 시정수의 변화에 따른 전류모델의 영향이 거의 없으며 중/고속 및 정/역 과 역 운전영역에서 뛰어난 제어성능을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

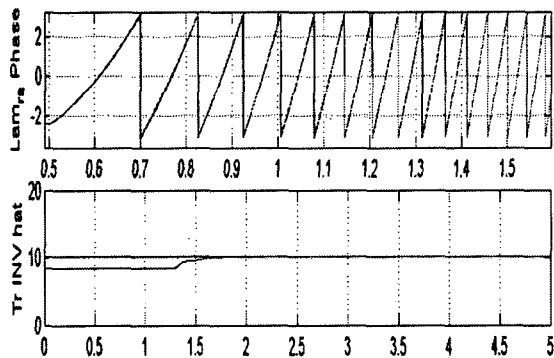


그림 9. 고속영역의 계단 속도지령에 대한 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정 (0rpm → 1500rpm, 무 부하)

Fig.9. Rotor Flux Phase inverse rotor time constant estimation for Step Speed reference of the high speed range (0rpm → 1500rpm, No Load)

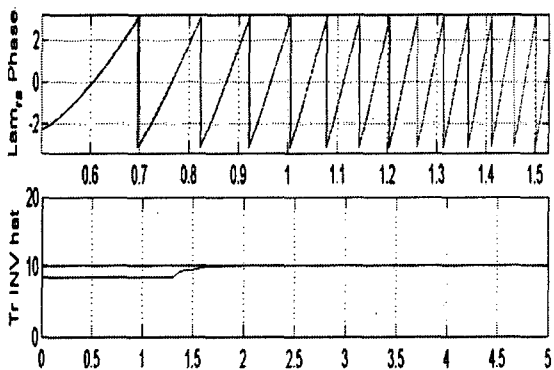


그림 10. 중/고속영역의 계단 속도지령에 대한 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정 (800rpm → 1500rpm, 무 부하)

Fig.10. Rotor Flux Phase inverse rotor time constant estimation for Step Speed reference of the middle/high speed range (800rpm → 1500rpm, No Load)

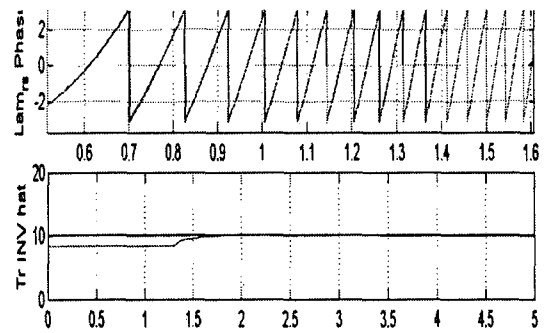


그림 11. 정/역 운전영역의 계단 속도지령에 대한 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정 (1500rpm → -500rpm, 무 부하)

Fig.11. Rotor Flux Phase inverse rotor time constant estimation for Step Speed reference of the Forward/Backward speed range (1500rpm → -500rpm, No Load)

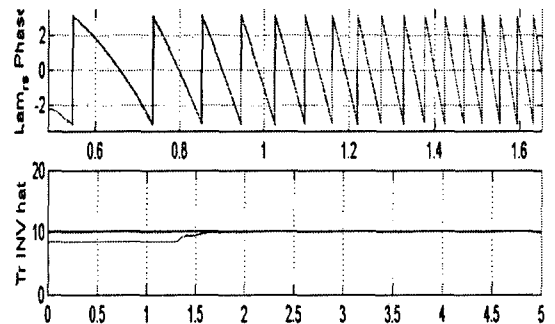


그림 12. 역 운전영역의 계단 속도지령에 대한 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정 (0rpm → -1000rpm, 무 부하)

Fig.12. Rotor Flux Phase inverse rotor time constant estimation for Step Speed reference of the Backward speed range (0rpm → -1000rpm, No Load)

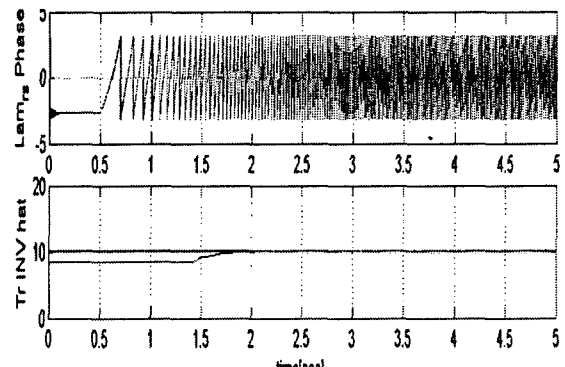


그림 13. 고속영역의 계단 속도지령에 대한 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정 (0rpm → 1500rpm, 무 부하)

Fig.13. Rotor Flux Phase inverse rotor time constant estimation for Step Speed reference of the high speed range (0rpm → 1500rpm, No Load)

### 3. 결론

본 논문에서는 유도전동기의 직접벡터 제어에 고피나스 모델 자속관측기를 사용한 시스템이 중/고속 영역에서 전동기 상수 오차에 둔감하게 제어 성능의 특성을 나타낼 수 있도록 자속관측기 전류모델의 회전자 시정수를 추정할 수 있는 방식을 제안하고 고피나스 모델 자속관측기를 이용한 일반화된 직접 벡터 제어시스템을 구성하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 중/고속 영역에서 전류모델의 회전자 시정수의 변화로 인한 회전자 자속 위치정보의 오차에 대한 제어성능의 저하에 대해 분석하고, 문제점에 대한 대처방안을 제시하였다.

고피나스 모델의 자속관측기는 저속영역에서는 전동기 상수의 오차문제 때문에 제어성능이 저하된다. 하지만 중속 혹은 고속이상의 정상상태에서는 고피나스 모델 자속관측기는 우수한 제어성능을 보인다. 하지만 일반적으로 중/고속 영역에서 또한 전류모델의 영향을 완전히 무시할 수는 없다. 따라서 전류모델에 포함되어 있는 전동기 상수 즉 회전자 시정수 변화로 인하여 회전자 자속의 위치정보의 오차가 발생하고, 따라서 전체적인 자속 관측기의 성능이 저하되며 이에 따른 직접벡터 제어 자체의 성능이 저하된다. 왜냐하면 자속관측기에서 추정된 회전자 자속의 위치정보는 직접벡터제어에서는 제어 성능을 결정하는 필수적인 요소이기 때문이다. 제안된 방식으로 고피나스 모델 자속관측기를 이용한 직접벡터 제어에서는 중/고속 영역 이상에서 실시간으로 전류모델 자속관측기의 회전자 시정수를 보상하여 주기 때문에 이러한 제어성능의 저하는 줄어들게 된다.

본 논문에서 제안하고 있는 방식의 가장 큰 장점은 기존의 직접벡터제어에 사용한 고피나스 모델 자속관측기를 그대로 이용할 수 있으며 회전자 자속의 위상을 이용한 회전자 시정수를 추정하는 PI 제어기만 하나 더 추가함으로써 간단하게 직접벡터제어를 구현할 수 있다. 하지만 이러한 고피나스 자속관측기를 이용한 직접벡터 제어에서 회전자 시정수 추정 알고리즘은 저속영역에서는 사용하기가 어려운 점이 있으며 이러한 문제점을 해결한다면 더욱 우수한 성능을 나타낼 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 한국과학재단 지정 울산대학교 네트워크 기반 자동화연구센터의 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] R. Gabriel, W. Leonhard and C. J. Nordby, "Field Oriented Control of a Standard AC Motor using

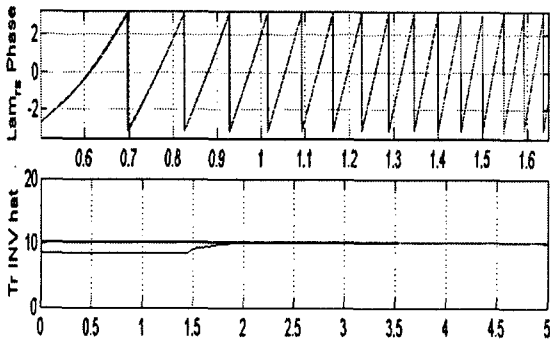


그림 14. 중/고속영역의 계단 속도지령에 대한 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정 (800rpm → 1500rpm, 무 부하)

Fig.14. Rotor Flux Phase inverse rotor time constant estimation for Step Speed reference of the middle/high speed range (800rpm → 1500rpm, No Load)

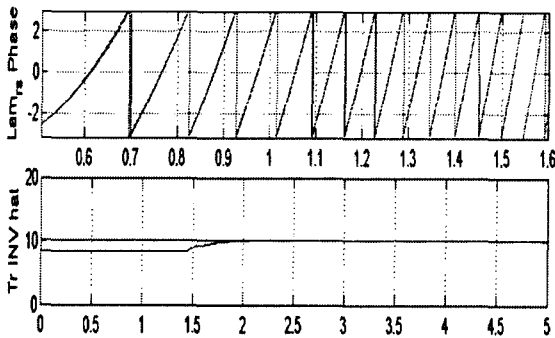


그림 15. 정/역 운전영역의 계단 속도지령에 대한 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정 (1500rpm → -500rpm, 무 부하)

Fig.15. Rotor Flux Phase inverse rotor time constant estimation for Step Speed reference of the Forward /Backward speed range (1500rpm → -500rpm, No Load)

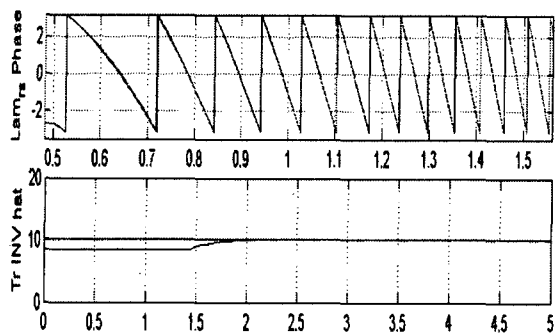


그림 16. 역 운전영역의 계단 속도지령에 대한 회전자 자속 위상 과 역회전자 시정수 추정 (0rpm → -1000rpm, 무 부하)

Fig.16. Rotor Flux Phase inverse rotor time constant estimation for Step Speed reference of the Backward speed range (0rpm → -1000rpm, No Load)

- Microprocessors," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 16, no. 2, March/April, 1980.
- [2] Luis J. Garces, "Parameter Adaption for the Speed Controlled Static AC Drives with a Squirrel cage Induction Motor," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 16, no. 2 March/April, 1980.
- [3] R. Krishnan and Frank C. Dorn, "Study of Parameter Sensitivity in High Performance Inverter-Fed Induction Motor Drive System," *IEEE Trans. on Ind Appl.*, Vol. 23, no. 4, July/August, 1987.
- [4] George C. Verghese and Seth R. Sanders, "Observers for Flux Estimation in Induction Machines," *IEEE Trans. on Ind. Elect.*, Vol. 35, no. 1, pp. 85-94, Feb., 1988.
- [5] Hisao Kubota, Kouki Matsuse and Takayoshi Nakano, "New Adaptive Flux Observer of Induction Motor for Wide Speed Range Motor Drives," *IEEE IECON90*, pp. 921-926
- [6] Malik Elbuluk, Nikola Langovsky and M. David Kankam, "Design and Implementation of a Closed-Loop Observer and Adaptive Controller for Induction Motor Drives," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 34, no. 3, pp.4 35-443, May/Jun. 1998.
- [7] Isao Takahasi and Toshihiko Noguchi, "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 22, no. 5, pp. 820-827, Sep/Oct. 1986.
- [8] Patrick L. Jansen and Robert D. Lorenz, "A Physically Insightful Approach to the Design and Accuracy Assessment of Flux Observers for Field Oriented Induction Machine Drives," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 30, no. 1, pp. 101-110, Jan/Feb. 1994.
- [9] Patrick L. Jansen and Robert D. Lorenz and Donald W. Novotny, "Observer-Based Direct Field Orientation : Analysis and Compensation of Alternative Methods," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 30, no. 4, pp. 945-953, Jul/Aug. 1994.
- [10] H.Kubota, K.Matsuse and T.Nakano, DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor, *IEEE Trans. on I.A.*, vol. 29, no. 2, Mar./Apr., pp. 344-348, 1993.
- [11] J.S.Kim, J.W.Choi and S.K.Sul, "Analysis and Compensation of Voltage distortion by zero current clamping in Voltage-Fed PWM inverter," *Conf. Rec. of IPEC-Yofohama*, pp. 265-270, 1995.
- [12] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A Simple On-Line Application for Indirect Field Orientation of an Induction Machine," *IEEE Trans. Ind. Vol.* 27, no. 4, July/Aug. pp. 720-727. 1991.
- [14] J.H.Kim, J.W.Choi and S,K.Sul, Novel Rotor Flux Observer Characteristic Function in Complex Vector Space for Field Oriented Induction Motor Drives , *IEEE Trans. Ind.Appl.* vol. 38, no. 5, pp. 1334-1343, Sep./Oct., 2002.