

## 속도 추정 알고리즘을 이용한 유도전동기 제어 시스템 특성

# A Characteristics of Control System for Induction Motor using a Speed Estimation Algorithm

황락훈<sup>1</sup> · 나승권<sup>2</sup> · 강진희<sup>1</sup>

<sup>1</sup>세명대학교 전기공학과

<sup>2</sup>한국폴리텍대학 원주캠퍼스 전기제어학과

Lark-Hoon Hwang<sup>1</sup> · Seung-kwon Na<sup>2</sup> · Jin-hee Kang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Semyung University, Chungcheongbuk-do, 27136, Korea

<sup>2</sup>Department of Information Electric Control Engineering, Korea Polytechnic College Wonju Campus, Gangwon-do, 26406, Korea

### [요 약]

유도전동기의 속도 제어를 원활하게 수행하기 위해서는 필요한 회전자 속도 정보를 얻어야 한다. 속도 정보를 얻으려면 센서를 사용하여 얻어야 하지만, 센서를 사용하지 않고 적절한 알고리즘을 이용하여 얻을 수도 있다. 속도 정보를 얻기 위해서 모델 기준 적응 시스템(MARS; model reference adaptive system)을 사용하여 시스템을 설계 하였고, 유도전동기의 속도 제어 방식 중에 하나인 간접 벡터 제어 방식으로 전동기의 전류와 회전자 파라미터 값으로부터 연산된 슬립 주파수를 회전자 속도와 합하여 자속의 위치 정보를 얻어내는 방식을 사용하였다. 실제 자속 정보 없이도 넓은 속도 영역에서 간단하게 순시 전류 제어를 행할 수 있으며 제어기의 구조가 간단하다는 장점을 가질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 간접 벡터 제어 방식을 기반으로 제어 시스템을 구성하였고, 이를 실현하기 위해 필요한 회전자 속도 정보를 센서로 사용하지 않고 개발한 지능형 알고리즘으로 추정하여 유도전동기의 속도 제어 시스템을 개발하였다.

### [Abstract]

In order to smoothly control the speed of the induction motor, it is necessary to obtain the required rotor speed information. In order to obtain the speed information, it must be obtained using a sensor, but it can also be obtained using an appropriate algorithm without using a sensor. In order to obtain speed information, a system was designed using a model reference adaptive system (MARS). Indirect vector control, one of the speed control methods of induction motors, was calculated from the motor current and rotor parameter values. The method of obtaining the position information of the magnetic flux by combining the slip frequency with the rotor speed was used. It is possible to simply perform instantaneous current control in a wide speed range without actual magnetic flux information, and has the advantage that the structure of the controller is simple. Therefore, in this paper, the control system was constructed based on the indirect vector control method, and the speed control system of the induction motor was developed by estimating the required rotor speed information as an intelligent algorithm developed without using it as a sensor.

**Key word** : Induction motor, Speed estimation algorithm, Motor speed control.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.2.101>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 3 April 2020; Revised 4 April 2020

Accepted (Publication) 20 April 2020 (30 April 2020)

\*Corresponding Author : Seung-kwon Na

Tel: +82-10-4963-7160

E-mail: skna2@hanmail.net

## 1. 서론

유도전동기의 속도 제어를 원활하게 실현하기 위해서는 회전자의 정확한 속도 정보가 필요하며, 이를 얻기 위해 속도 센서를 이용한다. 이러한 속도 센서들은 회전하는 회전자의 속도를 연속적으로 검출할 수 있는 장점이 있으나 정밀한 속도 정보를 얻는 데는 운전속도에 따라서 한계를 가질 수 있으므로 구동 시스템의 성능 향상에 문제 요소로 작용하게 된다.

유도전동기에 속도 센서를 부착하는 것은 유도전동기가 가지는 본래의 강인함을 약화시키고, 추가적인 센서의 부착으로 전체구동 시스템의 가격이 상승한다. 이와 같은 사용상의 한계점을 극복하기 위해서 속도 센서의 정보 대신 적합한 알고리즘에 의해 추정된 속도를 제어에 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[3].

구조가 간단하고 가격이 저렴한 유도전동기는 직류 전동기가 지닌 정기적인 유지 보수 및 최대 회전수 제한 등의 구조적인 문제점들을 극복할 수 있고, 최근 전력용 반도체 소자의 발달과 고성능 프로세서의 등장으로 전압 및 주파수 변환 장치들이 개발됨에 따라 운전 특성도 직류 전동기에 상응하는 응답을 얻을 수 있어 빠른 속도 변화와 고속운전이 요구되는 분야에 적용이 확대되고 있다.

따라서 센서를 사용할 수 없는 환경이나 센서의 사용으로 인해 발생하는 비용 증가와 성능 저하 등의 문제점을 해결하며 다양한 산업 현장의 수요에 적합한 유도전동기 제어 시스템의 개발이 필요하다[4]-[9].

본 논문에서는 유도전동기의 동특성은 고정자와 회전자 상호간의 결합효과로 인하여 매우 복잡하므로 이를 해석하고 제어하기 위한 유도전동기 등가 모델과 벡터 제어 방식에 대해서 조사하였다. 또한 벡터 제어를 수행하기 위해서 필요한 속도 정보를 얻기 위해 속도 센서를 사용하지 않고 적합한 알고리즘을 사용하여 속도를 추정하는 기존 방식에 대해서 조사하고, 이를 개선하기 위해서 사용되는 인공 지능 이론에 대해 조사하였다. 끝으로 유도전동기 구동 시스템의 고성능화를 실현하기 위해 사용되는 전류 제어 방식과 속도 제어 방식에 대하여 연구하였다.

## II. 유도전동기 시스템 제어

### 2-1 유도전동기의 이론

교류 전동기는 구조가 간단하여 가격이 싼 반면에 구동을 실현하기 위해서는 필수적으로 전력 변환 장치가 요구되고 이에 따른 전체 구동 시스템의 가격 상승 및 관련 기술의 개발 부진 등의 이유로 종래에는 널리 사용되지 못하였다.

그러나 최근 전력용 반도체 소자의 발달과 고성능 프로세서의 등장으로 전력 전자기술이 비약적으로 발전하여 저 가격, 고 신뢰성의 전압 및 주파수 변환 장치들이 개발됨에 따라

교류 전동기가 종전의 직류 전동기의 역할을 대신할 수 있게 되었다. 특히 구조가 간단하고 값이 싼 농형 유도전동기는 직류 전동기가 지닌 정기적인 보수 및 최대 회전수 제한 등의 구조적인 문제점들을 극복할 수 있고, 운전 특성도 직류 전동기에 상응하는 응답을 얻을 수 있어 빠른 가 감속과 고속 운전이 요구되는 서보 시스템 및 공작 기계 구동장치 등에도 적용이 확대되고 있는 추세이다.

### 2-2 유도전동기의 등가모델

유도전동기 권선의 3상 대칭 정현 분포를 가정하고, 슬롯에서 비롯되는 자기회로의 비선형성과 자속의 고조파 성분 등을 무시하면 3상 대칭 유도전동기의 등가 모델은 그림 1과 같다. 3상 좌표계 상에서 고정자와 회전자에 대한 복소 변수 전압 방정식과 전류, 자속 사이의 관계는 식 (1) 및 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 여기서  $f_{abck}$ 는 전압, 전류 및 자속의 a, b, c 상이 될 수 있고, k는 고정자 s 및 회전자 r를 나타내고,  $\theta_r$ 은 고정자 축에 대한 회전자 축의 상대 위치를 나타낸다.

$$\begin{aligned} V_{abcs} &= R_s I_{abcs} + p\lambda_{abcs} \\ V_{abcr} &= R_r I_{abcr} + p\lambda_{abcr} \\ \lambda_{abcs} &= L_s I_{abcs} + L_m e^{j\theta_r} I_{abcr} \\ \lambda_{abcr} &= L_m e^{-j\theta_r} I_{abcs} + L_r I_{abcr} \\ f_{abck} &= [f_{ak} f_{bk} f_{ck}] a T \\ a &= [1 a a^2] \end{aligned} \tag{1}$$

$$a = e^{j2\pi/3} \tag{2}$$

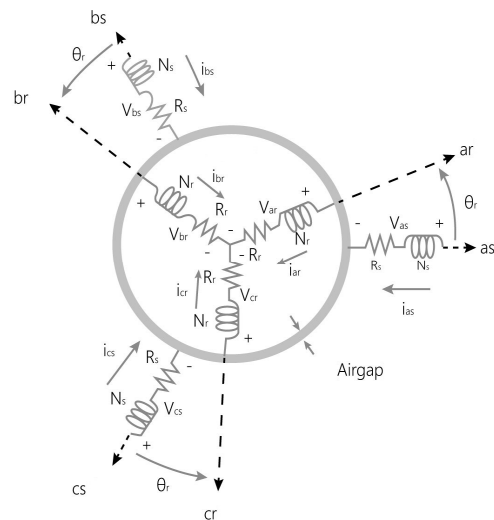


그림 1. 고정좌표계에서의 동적 등가회로  
Fig. 1. Dynamic equivalent circuit in fixed coordinate system.

2-3 유도전동기의 직접 벡터 제어

벡터제어라고 불리는 자속 기준 제어는 유도전동기의 고정자 전류를 자속 성분과 토크 성분 전류로 분리시켜 각각을 독립적으로 제어하여 빠른 토크 응답을 얻을 수 있다. 이때 자속 성분 전류는 항상 기준 자속 벡터와 일치하므로 동기 좌표계의 d축에 상응하고, 토크 전류 성분은 기준 자속 벡터와 수직하도록 하며 동기 좌표계의 q축에 상응한다.

직접 측정법은 hall 소자나 자속 검출 코일을 설치해야 하는데 기계적으로 취부하기 어려울 뿐만 아니라 슬롯에 발생하는 고조파가 전동기 속도에 따라 변하는 단점 때문에 실제로는 전동기 정수와 전압, 전류, 속도 등으로부터 추정된 자속 벡터를 사용하는 것이 일반적이다. 이때 자속 각은 식 (3)과 같다.

$$\sin\theta_e = \frac{\lambda_{qr}^s}{\sqrt{\lambda_{dr}^s + \lambda_{qr}^s}^2} \tag{3}$$

$$\cos\theta_e = \frac{\lambda_{dr}^s}{\sqrt{\lambda_{dr}^s + \lambda_{qr}^s}^2}$$

$$\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_{qr}^s}{\lambda_{dr}^s}\right)$$

이들 회전자 자속은 유도전동기의 전압 모델과 전류 모델을 이용하여 추정할 수 있으나 기본적으로 개루프 방식에 의해 자속을 추정하게 되므로 직류 오프셋에 의해 적분기가 한 쪽으로 포화 할 수 있고, 저속에서의 고정자 전압 강하의 증가 및 파라미터 변동에 대한 보상책을 마련하기 어려워 추정 값에 대한 신뢰성이 저하될 수 있는 문제점이 있다. 그림 2는 직접 벡터 제어에 대한 전체 시스템 블록도이다.

2-4 유도전동기의 간접 벡터 제어

슬립주파수형 또는 피드포워드(feed-forward)제어라 하는 이 방식은 1969년 Hasse가 제안한 것으로 전동기의 전류와 회전자 파라미터로부터 연산된 슬립 주파수를 회전자 각 속도와 합하여 자속의 위치 정보를 얻어내는 방식이다.

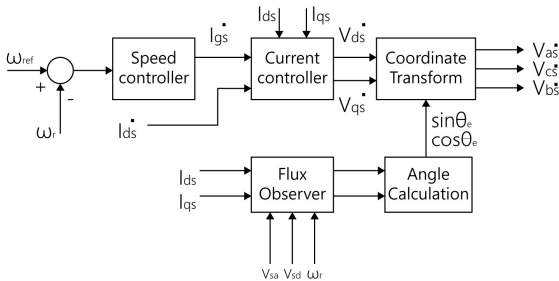


그림 2. 직접 벡터제어 시스템  
Fig. 2. System of direct vector control.

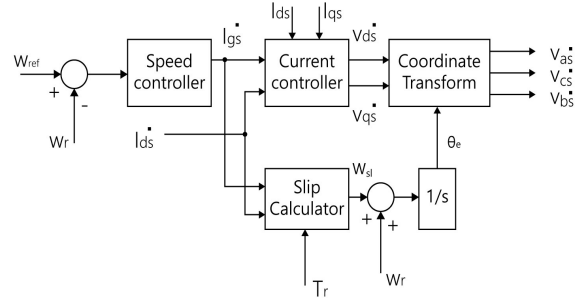


그림 3. 간접 벡터제어 시스템  
Fig. 3. System of indirect vector control.

실제 자속 정보 없이도 넓은 속도 영역에서 간단히 순시 전류 제어를 행할 수 있으며 제어기의 구조가 간단하다는 장점이 있다.

그림 3과 같이 간접 벡터 제어는 직접 측정된 자속을 이용하지 않고 전동기의 토크 성분 전류와 자속 성분 전류, 그리고 파라미터 정보로부터 슬립 주파수를 계산하여 측정된 전동기 속도와와의 합으로 자속의 속도를 얻어서 현재의 자속 위치를 찾아내는 방식으로 실제 자속에 대한 정보 없이도 비 간접 제어를 수행할 수 있어 대부분의 응용 분야에서 사용하고 있다.

2-5 속도 추정 방식

기준 모델 적응 시스템은 1958 년에 Whitacker에 의해 처음 소개된 이래 플랜트 및 제어기 내에 값을 모르는 파라미터나 시변 파라미터에 대한 추정에 널리 사용되어 왔다.

그림 4는 GRMAS (general reference model adaptation system) 의 기본적인 구조를 나타낸 것으로, 여기서 기준 모델(reference model)은 어떤 입력에 대해 플랜트와 가장 유사한 출력을 보이는 모델 또는 그 자체 플랜트를 의미하며, 추정 모델(adjustable model)은 변동되는 파라미터를 포함하여 그 변동에 의해 영향을 받는 모델 이다. 구성요소들은 추정 파라미터 값을 포함하지 않는 기준모델(reference model)과 추정 파라미터 값을 포함하며,

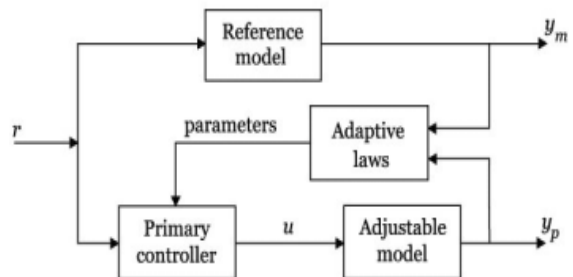


그림 4. 일반적인 기준 모델 적응 시스템  
Fig. 4. General reference model Adaptation system.

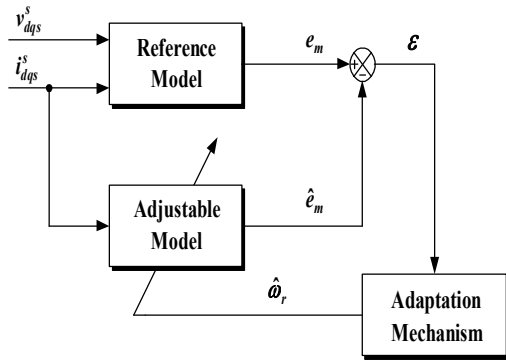


그림 5. 자속 기준 모델 적응방식의 구조  
 Fig. 5. Structure of flux model reference adaptive system.

적응 메커니즘으로부터 그 추정 값을 피드백 받는 조절 모델(adjustable model), 추정 파라미터를 발생시키는 적응 메커니즘(adaptation mechanism)으로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 그림 5과 같이 가장 많이 사용되고 있는 방법인 기준모델과 조절모델을 병렬로 결합시킨 병렬 형 기준모델 적응방식을 사용하였으며, 또한 추정 값을 발생하기 위한 입력방법에는 기준모델과 조절모델의 출력을 바탕으로 생성된 오차 값  $\epsilon$  을 이용하는 출력 오차법을 사용하였다.

적응 규칙은 그 두 모델의 출력의 오차를 통해 추정 모델의 출력이 기준 모델의 출력을 따라가도록 기준 모델과 추정 모델의 출력 오차에 적응 기법을 적용해 그 오차를 영(零)으로 만들어 주는 파라미터 값을 추정해 내는 것이다. 따라서 모델 기준 적응 시스템에서 가장 중요한 부분은 안정도를 고려한 적응 법칙의 설계이다.

전압모델에서는 전동기 상수의 영향을 거의 받지 않는 반면 전동기의 운전속도가 낮은 영역에서는 역기전력이 작은 관계로 정확도가 떨어지고 전류모델에서는 전 운전영역에서 동일한 정확도를 유지하나 전동기의 파라메타에 크게 의존하는 단점을 가지고 있다.

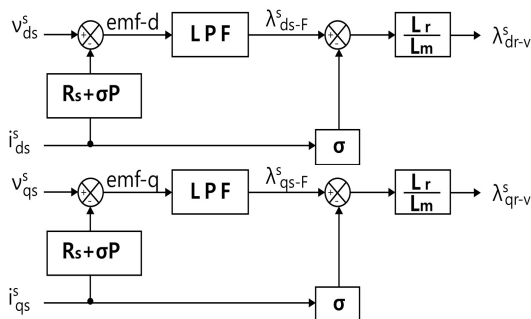


그림 6. 전압 모델 자속 추정기 블록도  
 Fig. 6. Block diagram of voltage model flux estimator.

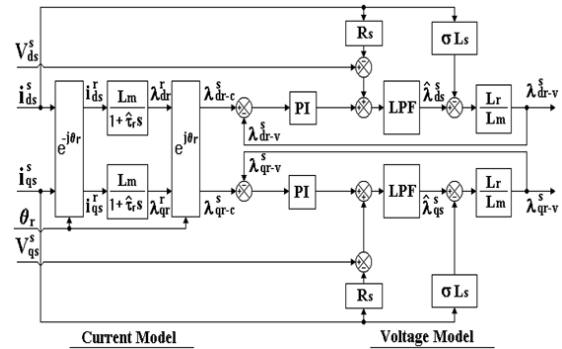


그림 7. 전압전류 모델 합성 자속 추정기  
 Fig. 7. Block diagram of voltage, current model complex flux estimator.

III. 시뮬레이션 및 실험 결과

일반적으로 역기전력이 큰 고속운전영역에서는 고정자 전압을 적분하여 구한 전압모델이 전동기 제정수의 변동에 강인하여 자속 추정에 유리하고, 역기전력이 작은 저속운전영역에서는 회전자 회로를 이용한 전류 모델이 측정신호의 오차에 강인하여 추정 특성이 우수하다. 그러므로 저속운전영역에서는 전류 모델 자속 추정기를 사용하고, 고속운전영역에서는 전압 모델 자속 추정기를 사용하여 자속을 추정하는 것이 유리하다.

그림 7은 전압 모델과 전류 모델을 함께 사용하는 자속 추정기의 블록도이다. 그러므로 그림 7의 전압-전류 모델 합성 자속 추정기는 저속운전영역에서는 전류모델 자속 추정기를 활용하고, 고속운전영역에서는 전압모델 자속 추정기를 이용하여 자속을 추정하는 기법이다. 그림 7의 전압-전류 모델 합성 자속 추정기는 그림 8과 같이 간략화 하여 해석할 수 있다.

본 논문에서는 시뮬레이션은 각각 무부하시와 부하시로 나누어 각각 정격 속도에 대하여 정속회전과 정.역회전을 시행하였다. 전체 시스템은 디지털로 구현하였으며 속도 제어기 및 시스템의 샘플링 시간은 1 msec이며 전류 제어기 및 속도 추정기 부분의 샘플링 시간은 100  $\mu$ sec로 하였다.

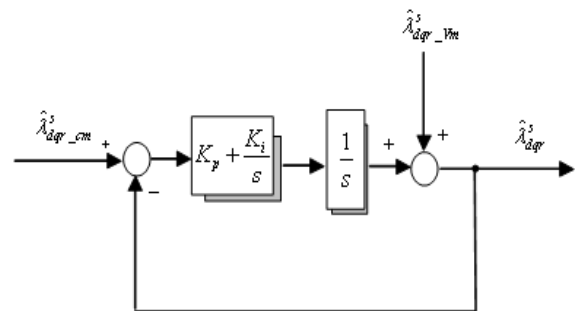


그림 8. 간략화한 전압전류 모델 합성 자속 추정기  
 Fig. 8. Simplified voltage, current model complex flux estimator.

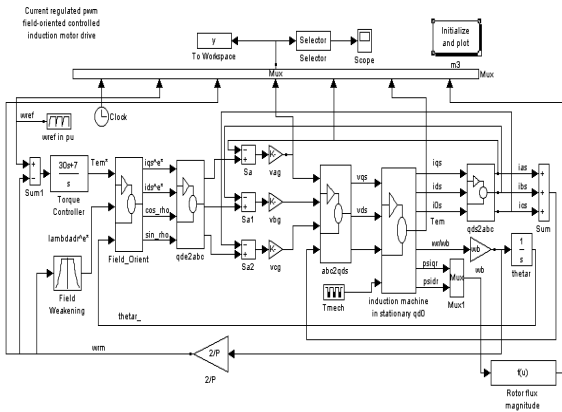


그림 9. 시뮬레이션 구성도  
Fig. 9. Simulation constitution diagram.

그림 9 실험에서는 간접 벡터 제어 방식을 기반으로 제어 시스템을 구성하였고, 이를 실현하기 위해 필요한 회전자 속도 정보를 센서로 사용하지 않고 개발한 지능형 알고리즘으로 추정하여 유도전동기의 속도 제어 시스템을 개발하였다.

이러한 속도 추정 방식을 사용한 시스템에서 속도 제어 성능을 개선하기 위하여 인공지능 이론을 적용하였는데, 그 중에서 퍼지 제어와 신경 회로망을 적용하였다.

퍼지 및 신경망을 이용한 지능형 속도 추정기의 Matlab 모델링은 Matlab 툴박스인 Fuzzy-Logic Tool Box와 Neural-Network Tool Box를 사용하여 구현하였다. 속도 추정 알고리즘 블럭의 입력으로는 기준 모델과 조정모델로부터 구하여진 회전자 자속의 기준값  $|\lambda_r^*|$  과 추정값  $|\lambda_r^{\wedge}|$ , 그리고 이 두 값들의 오차, 오차의 변화, 신경망 회로의 역전과 오차함수로 구성되어 있다. 우선 퍼지 규칙을 설계하였고, 성능 테스트를 거친 후 신경회로망을 구성하였다. 퍼지 규칙은 Matlab에서 제공되는 GUI (graphic user interface) 기반의 FIS(fuzzy inference system) editor를 이용하여 구성하였다.

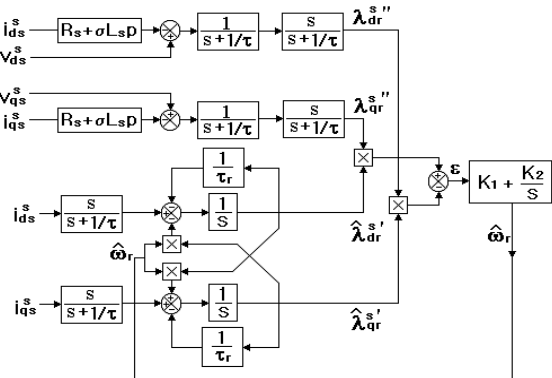


그림 10. 회전자 속도추정기의 구성도  
Fig. 10. Structure of rotor speed estimator.

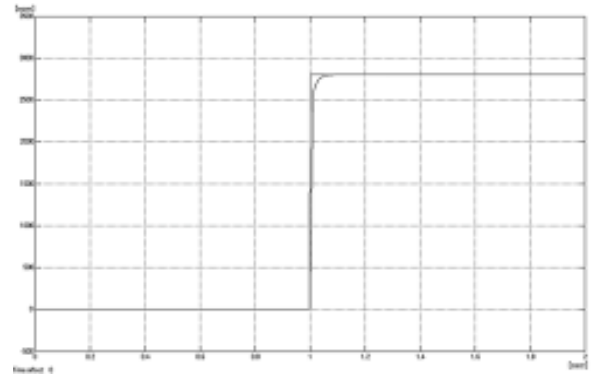


그림 11. 무부하시의 모델 회전자 속도  
Fig. 11. Model a rotor speed of no load.

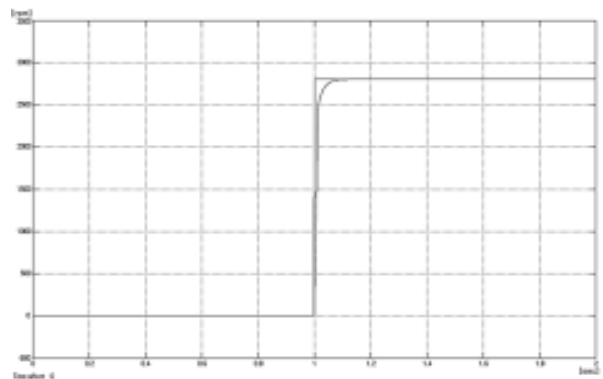


그림 12. 무부하시의 추정된 회전자 속도  
Fig. 12. Estimated rotor speed at no load.

유도전동기의 제어시스템은 슬립 주파수를 계산하였고, 이 계산된 슬립 주파수와 회전자의 속도를 가지고 간접적으로 자속각의 위치를 계산하는 그림 10과 같이 회전자 자속 기준 간접 벡터 제어 방식을 구성하였다.

그림 11은 무부하에서의 모델 회전자 속도를 나타내었으며, 그림 12는 무부하에서의 추정된 회전자 속도응답을 나타내었다. 시뮬레이션을 행한 결과 무부하시에는 정속 회전 시 -0.14%의 오차를 보였다.

이 오차는 정상상태에서의 오차이며, 개발한 제어 시스템의 제어 성능이 우수함을 보여준다. 부하 시에는 정속 및 정역회전 시 각각 -0.28% 및 -0.32%의 오차가 발생했다. 이는 부하를 인가하였을 경우에 무부하시에 비하여 제어 성능이 약간 떨어지지만 0.14 ~ 0.2% 정도의 차이는 무시할 수 있는 정도의 오차이다. 정착시간은 정속 및 정역회전 시 유사하였으며 부하 인가 시에는 0.1 sec 정도의 차이를 보이고 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이, 본 과제에서 개발한 제어 시스템이 정속 및 정역 운전 시에 건설한 제어 성능을 보임을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 지능형 속도 추정 알고리즘을 이용한 유도전동기 제어 시스템은 유도 전동기 백터 제어 시 속도 센서를 사용함으로 인해 발생하는 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서 속도 센서를 사용하지 않고 속도를 추정하는 기존의 속도 추정 방식에 인공 지능 이론을 적용하여 지능형 속도 추정 알고리즘을 개발하여 속도 추정 성능을 개선하고, 개발한 지능형 속도 추정 알고리즘을 이용하여 추정한 속도를 유도전동기의 백터 제어에 적용하여 유도전동기 제어 시스템을 개발함으로써 유도전동기의 제어 성능이 실험을 통하여 확인 할 수 있었다.

#### References

[1] M. Hinkkanen, "Analysis and design of full-order flux observer for sensorless induction motors," *IEEE 2004*, Vol. 51, No 5. pp. 1033-1040, 2004.

[2] H. T. Lee, L. C. Fu, and S. H. Hsu, "Adaptive speed/position control of induction motor with unknown load torque," in *Proceedings of American Control Conference Anchorage*, Anchorage: AK, pp.4583-4588, 2002.

[3] J. S. S. Prasad, R. Ghosh, and G. Narayanan, "Common-mode injection PWM for parallel converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 62, No. 2, pp. 789-794, Feb. 2015.

[4] F. Gao, L. Zhang, D. Li, P. C. Loh, Y. Tang, and H. Gao,

"Optimal pulse width modulation of nine-switch converter," *IEEE Transactions Power Electronics*, Vol. 25, No. 9, pp. 2331-2343, Sep. 2010.

[5] F. Gao, L. Zhang, and P. Loh, "Dead-time elimination of nine-switch converter," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Fort Worth: TX, pp. 673-678, 2011.

[6] Y. Chen, G. Wen, and Y. Kang. "Sliding mode pulse width modulation (SMPWM) for nine-switch converter," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Taipei: Taiwan, pp. 1-6, 2013.

[7] Z. Qin, P. C. Loh, and F. Blaabjerg, "Application criteria for nine-switch power conversion systems with improved thermal performance," *IEEE Transactions Power Electronics*, Vol. 30, No. 8, pp. 4608-4620, Aug. 2014.

[8] 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 Industrial Electronics*, Vol. IE-42, No. 2, pp. 192 ~ 198, April 2009.

[9] F. M. L. De Belie, P. Sergeant, and J. A. Melkebeek, "A sensorless drive by applying test pulses without affecting the average-current samples," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 4, pp. 875-888, April 2010.



#### 황 락 훈 (Lark Hoon Hwang)

1981년 2월 : 명지대학교 전기공 학과 (공학사)  
 1983년 8월 : 명지대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)  
 1989년 8월 : 명지대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)  
 1988년 3월 ~ 1991년 2월 충남전문대학 전기과 (현, 대덕대학 전기과) 조교수  
 1991년 3월 ~ 현재 세명대학교 전기공학과 교수  
 ※ 관심분야 : 전동기 제어, 대체 에너지 분야, 에너지 변환, 반도체 시뮬레이션, 전력전자 응용분야



#### 나 승 권 (Seung Kwon Na)

1999년 2월 : 세명대학교 전기공학과 (공학사),  
 2001년 2월 : 세명대학교 대학원 전기전자공학과 (공학석사)  
 2008년 2월 : 세명대학교 대학원 전기전자공학과 (공학박사)  
 1981년 7월 ~1988년 4월 : 삼육의료원 부산(한방)병원  
 1988년 5월 ~1994년 8월 : 한국수자원공사  
 1994년 9월 ~현재 : 한국폴리텍대학 원주캠퍼스 전기제어학과 교수  
 ※ 관심분야 : 의공학, 신재생에너지 및 대체에너지분야, 에너지변환, 전력전자응용분야



#### 강 진 희 (Jin Hee Kang)

2009년 2월 : 세명대학교 전기공학과 (공학사)  
 2011년 2월 : 세명대학교 대학원 전기전자공학과 (공학석사)  
 2020년 2월 : 세명대학교 대학원 전기전자공학과 (공학박사)  
 ※ 관심분야 : 전기전자, 태양광발전, 전기에너지 변환