

## 철도차량 추진 제어를 위한 유도전동기 센서리스 구동 시스템에서 타행운전시 속도 추정

### Speed Estimation at Coasting Condition in a Sensorless Induction Motor Drive for Railway Vehicle Traction System

김 상 훈\*      박 내 춘\*\*  
Kim, Sang-Hoon      Park, Nae-Chun

#### Abstract

In this paper, a speed estimation method at coasting operation in an induction motor speed sensorless control for railway vehicle traction systems is presented. At coasting operation, there is no information obtaining rotor speed since all switches of an inverter are turned off. The inverter frequency should be synchronized with the rotor frequency for repowering at coasting condition. The proposed method injects DC current to the induction motor during a short time, then the flux angle and rotor speed needed for control can be estimated rapidly.

키워드 : 철도 차량, 속도 추정, 타행운전  
Keywords : railway vehicle, speed estimation, coasting operation

#### 1. 서론

철도교통은 타 교통수단에 비하여 효율적이고, 환경 친화적인 교통시스템이다. 열차의 주행을 위해 소비되는 에너지는 열차의 주행패턴에 따라 많은 변화가 있는데, 일반적으로 인버터의 스위칭 손실을 줄이기 위하여 열차를 일정한 속도까지 가속시킨 후 일정 구간동안 모든 인버터 스위치를 오프하는 타행운전을 하게 된다[1].

타행 상태에서부터 정상 운전 상태로 복귀하기 위해서는 인버터 주파수를 회전자 회전속도에 일치시켜 동작시켜야 한다. 이를 동기 투입이라고 한

다. 이를 위해서는 타행 상태에서의 회전자 회전속도를 알아야 한다.

회전자 속도를 알기 위해서 통상 전동기 측에 부착된 광학식 엔코더를 사용하여 전동기의 위치 및 속도 정보를 얻고 있다. 그러나 속도 센서를 사용하지 않으면 시스템의 가격이 상승하며, 센서 부작으로 인해 구동 전동기의 크기가 증가하게 된다, 또한 철도차량과 같이 진동이나 온도 변동이 심한 환경에서는 센서의 정기적인 유지관리가 요구된다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 속도 센서를 사용하지 않는 철도차량 추진제어 시스템의 센서리스 제어에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다[1].

속도 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어에서는 동기 투입 직전의 회전자의 위치 및 속도 정보를 얻을 수 없다. 그러나 타행 상태에서 복귀 직후에 전동기의 슬립 주파수는 영이므로 회전자 자속은 현재 회전자 속도에 비례한 각주파수를 갖게

\* 강원대학교 전기전자공학부 교수, 공학박사, 교신저자  
\*\* 강원대학교 전기전자공학부 대학원, 박사과정

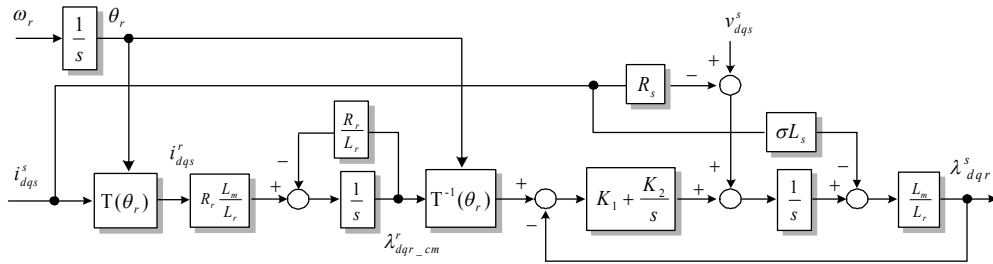


그림 1 자속 추정기

된다. 따라서 자속의 각주파수로부터 회전자 속도를 얻을 수 있다. 하지만 인버터가 오프(Off) 되어 전동기의 인가전압과 전류가 없는 상태인 타행 상태에서는 자속 추정에 필요한 어떠한 정보를 얻을 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 타행운전에서 복귀 시 유도전동기에 직류 전류를 흘려 회전자의 회전속도를 추정하는 방법을 제시하고, 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

## 2. 타행에서 운전 복귀 시 각주파수 추정

타행 상태에서 오프(Off) 상태인 인버터를 다시 투입하여 정상 운전으로 복귀하기 위해서는 타행 상태에서의 회전자 회전 속도를 알아야 한다. 타행 상태에서 복귀 직후에 전동기의 슬립 주파수는 영이므로 회전자 자속은 현재 회전자 속도에 비례한 각주파수를 갖게 된다. 따라서 자속의 각주파수로부터 회전자 속도를 얻을 수 있다. 회전자 자속은 다음과 같이 혼합 자속 추정기를 사용하여 얻을 수 있다.

역기전력이 큰 고속 영역에서는 고정자 전압을 적분하여 자속을 구하는 전압 모델이 전동기 정수의 변동에 강인하여 자속 추정에 유리하고, 역기전력이 작은 저속 영역에서는 회전자 속도의 정보를 사용하는 회전자 회로를 이용한 전류 모델이 비교적 측정 신호의 오차에 강인하여 추정 특성이 우수하다. 저속에서는 전류 모델을 사용하고 고속에서는 전압 모델을 사용하여 자속을 추정하기 위해 전류 모델과 전압 모델을 혼합하여 저속에서는 전류 모델로부터 자속을 추정하도록 하며, 고속에서는 전압 모델로부터 자속을 추정하도록 하여 전운전 영역에서 우수한 자속 추정 특성을 갖도록 하는 전압과 전류 모델을 혼합한 자속 추정기의 블록도가 그림 1에 보인다.

이러한 자속 추정기법은 전류 모델과 전압 모델을 혼합하여 각각의 모델에서 발생하는 추정 오차를 감소시키도록 하기 때문에 모든 운전 속도 영역에서 비교적 우수한 자속 추정 특성을 얻을 수 있다. 그림 1의 자속 추정기를 간략화하면 그림 2

와 같다.

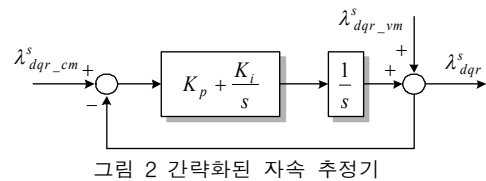


그림 2 간략화된 자속 추정기

여기서,  $\lambda_{qdr\_cm}^s$ 은 전류 모델로 구한 회전자 자속이며,  $\lambda_{qdr\_vm}^s$ 은 전압 모델로 구한 회전자 자속이다. 또한  $K_p = K_1 L_r / L_m$ ,  $K_i = K_2 L_r / L_m$ 이다. 간략화된 혼합 자속 추정기의 전달 함수는 식 (1)과 같다.

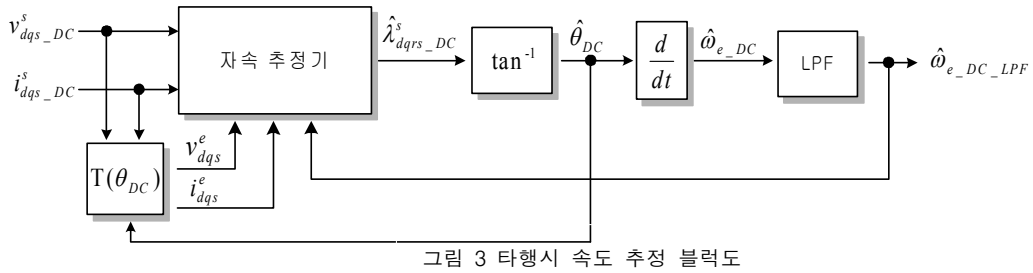
$$\lambda_{qdr}^s = \frac{\left[ \lambda_{qdr\_vm}^s + \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1}{s} \right] \lambda_{qdr\_cm}^s}{1 + \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{1}{s} \right)} \quad (1)$$

이 전달 함수를 정리해보면 식 (2)와 같이 전압 모델로 구한 자속  $\lambda_{qdr\_vm}^s$ 에는 2차 고역 통과 필터 (high pass filter)를, 전류 모델로 구한 자속  $\lambda_{qdr\_cm}^s$ 에 2차 저역 통과 필터 (low pass filter)를 거친 형태로 분리할 수 있다.

$$\lambda_{qdr}^s = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{qdr\_vm}^s + \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{qdr\_cm}^s \quad (2)$$

따라서 혼합 자속 추정기는 저속에서는 전류 모델로부터 추정된 자속이 선정되며, 고속에서는 전압 모델로부터 추정된 자속이 선정된다.

회전자 자속의 통해 회전자의 속도를 추정할 수 있는데, 이를 위해 먼저 식(3)과 같이 회전자 자속



각을 구해야 한다.

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \frac{\hat{\lambda}_{qr}^s}{\hat{\lambda}_{dr}^s} \quad (3)$$

식(3)에서 구한 자속 각을 미분하여 식(4)와 같이 동기 각주파수  $\hat{\omega}_e$ 를 추정하게 된다.

$$\hat{\omega}_e = \frac{d\hat{\theta}_e}{dt} \quad (4)$$

본 논문에서는 타행으로부터 정상 운전 복귀 직전에 단시간 동안 유도전동기에 직류 전류를 흘려 제어에 필요한 자속각과 회전자 속도를 빠르게 추정하도록 하였다. 그림 3은 개발된 타행 시 속도 추정기의 블록도를 보여준다.

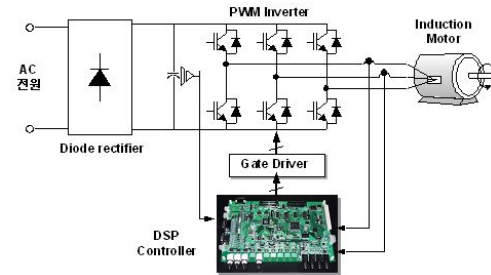
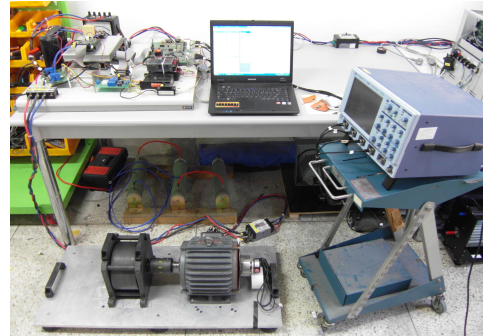


그림 4 실험 장치의 구성

실험에 사용된 유도전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1 유도전동기의 사양

Power	3.7 [kW]
Number of Poles	4
Frequency	60 [Hz]
Rated Speed	1730 [rpm]
Torque	20.4 [Nm]
Voltage	220 [V]
Current	18 [A]

실험에 사용한 유도 전동기의 제정수는 표 2와 같다.

표 2 유도전동기의 제정수

$R_s$	0.481 [ $\Omega$ ]
$R_r$	0.5 [ $\Omega$ ]
$L_{ls}$	1.95 [mH]
$L_{lr}$	1.95 [mH]
$L_m$	62.2 [mH]

### 3.2 실험 결과

그림 5는 타행시 회전자 d-q축 정좌표계에  
서의 회전자 자속과 자속 각을 나타내고 있다. a상  
에 직류 전압을 인가하여 혼합 자속 추정기를 이  
용하여 회전자의 자속 각을 추정하였다. 직류 전  
류를 흘려주고 나서 안정된 회전자 자속 각을 얻  
기 위해서는 일정한 시간이 필요한데, 대략 회전자  
회로의 시정수(126[ms])의 2배 정도 시간인  
230[ms]가 요구됨을 확인할 수 있다. 직류 여자  
Flag가 로우가 될 때 추정된 자속각은 정상 상태  
운전을 위한 초기값으로 사용되게 된다.

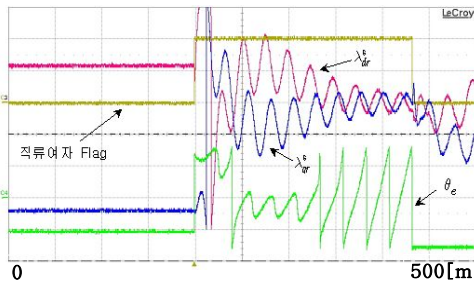


그림 5 직류 전류 인가 후 자속 각 추정 결과

속도 제어에서의 타행 운전 중 속도 추정 특성  
이 그림 6에 보인다. 1500[rpm]에서 인버터를 오피  
시킨 후 관성으로 회전하는 도중에 다시 속도를  
추정하여 속도 제어를 수행하는 실험을 반복하여  
수행하였다. 실험 결과로부터 타행 운전 상태에서  
정상 운전으로의 부드러운 전환이 가능함을 알 수  
있다.

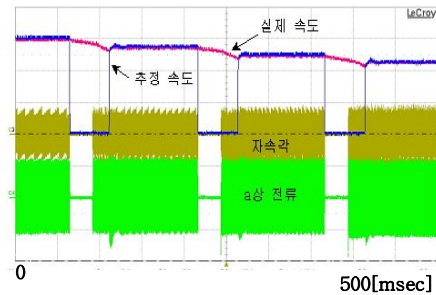


그림 6 타행 중 속도 추정 시험 결과 : 속도 제어  
(속도 500[rpm/div], 자속각 [2/div], a상 전류 5[A/div])

그림 7은 저속(350[rpm])에서 타행 운전 중 속  
도 추정 특성을 나타낸다. 저속에서도 타행 중의  
속도 추정이 잘 되는 것을 확인할 수 있다.

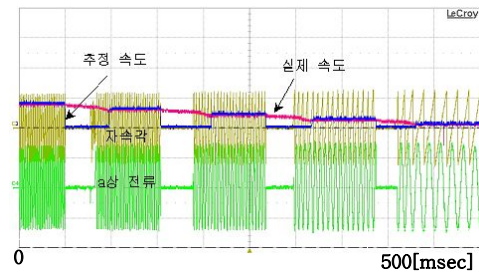


그림 7 타행 중 속도 추정 시험 결과 : 속도 제어  
(속도 500[rpm/div], 자속각 [2/div], a상 전류 5[A/div])

토크 제어 모드에서의 타행 운전 중 속도 추정  
특성이 그림 8에 보인다. 속도 제어 모드에서와 같  
이 타행 운전과 정상 운전을 반복하여 수행하였다.  
실험 결과로부터 토크 제어 모드의 경우에도 제안  
된 기법의 속도 추정 특성이 우수하여 부드러운  
인버터의 동기 투입이 가능함을 알 수 있다.

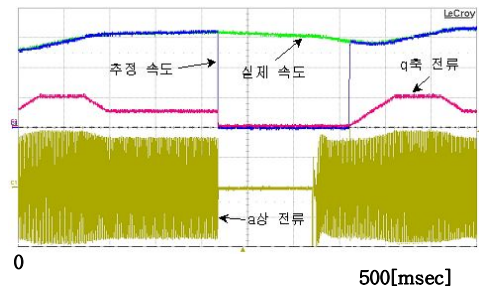


그림 8 타행 중 속도 추정 시험 결과 : 토크 제어  
(속도 500[rpm/div], 전류 4[A/div])

그림 9는 저속 약 400[rpm]에서 타행 운전 중 속도 특성을 나타내고 있다. 저속에서도 타행 중 속도 추정이 잘 되는 것을 확인 할 수 있다.

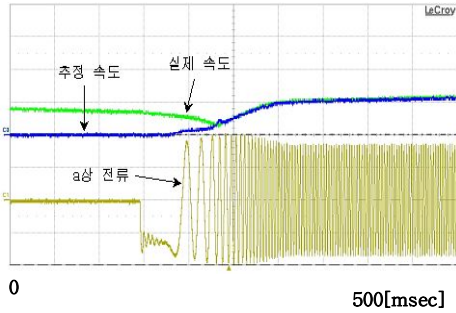


그림 9 타행 중 속도 추정 시험 결과 : 토크 제어  
(속도 500[rpm/div], 전류 4[A/div])

#### 4. 결론

타행 상태에서 오프 상태인 인버터를 다시 투입하여 정상 운전으로 복귀하기 위해서는 동기 투입 직전의 회전자 회전 속도를 알아야 한다. 본 논문에서는 정상 운전 직전 단시간 동안 타행 중의 유도 전동기에 직류 전류를 흘려 제어에 필요한 자속각과 회전자 속도를 추정하도록 하였다. 직류 전류를 흘려주고 나서 안정된 회전자 자속 각을 얻기 위해서는 대략 회전자 회로의 시정수의 2배 정도의 시간이 필요하다. 실험 결과 타행 운전 상태에서 정상 운전으로 부드러운 전환이 가능함을 알 수 있다. 본 논문에서 제시한 동기투입 방법은 센서리스 운전을 하는 철도차량 추진제어시스템에서 빠르고 안정적인 속도 추정 기법으로 유용하게 쓰일 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] K Kondo, "Application of speed-sensor-less induction motor control for traction motor control system," *QR of RTRI*, vol.44, no.1, pp.22-27, Mar. 2003.
- [2] K Kondo and et al., "Evaluation of induction motor speed sensorless control for railway vehicle traction system," *EPE' 2005 Dresden*, 2005.
- [3] Kondo.k., Yuki.K., "An application of the induction motor speed sensor less control to railway vehicle traction system.," *IEEE-IAS Ann. Mtg. Conf. Rec.*, PP 2022-2027, 2002.
- [4] Oqawa T., Ishida S., Kojima T., Sato T.,

Taquchi H., Ohashi S., "Speed sensorless vecor control for rolling stock", *IEEE Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on.*, PP 1-7, 2005.

- [5] 김상훈, *DC 및 AC 모터 제어*, 북두출판사, 2008.