

# 극 저속 전동기용 관측기 및 제동 토크 제어 기술

김영춘<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계자동차학부

## The Extreme Low Speed Motor Observer and Brake Torque Control Technologies

Young-Choon Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Automotive Engineering, Kongju National University

**요 약** 영구자석형 동기전동기에 벡터제어를 적용하여 정지시까지 전기제동을 하였으며, 속도검출기는 레졸바를 사용하여 제어기에서 관측자에 의한 위치와 속도를 추정하는 방식을 제안하였다. 또한, 정지직전의 극저속에서 속도에 의한 제동 토크를 제어하는 방법으로 정지시까지 전기제동을 하였다. 그 결과 제륜자의 소모율 저감과 유지보수성을 증대시키고 소음 및 분진발생의 저감, 승차감과 에너지 사용효과를 향상시켜 전동차의 성능을 향상 시켰음을 알 수 있었다.

**Abstract** This paper relates to the electric braking, the permanent magnet synchronous motor vector control is suspended until the applied, and propose a new scheme by the controller in the observer to estimate the position and velocity using the Resolver speed detector.

In addition, as a way to control the speed by braking torque at low speed, the pole of a stop just before the stop electrical braking. As a result, noise and dust abatement, consumption, reduction of the brake shoe increase the maintainability of comfort and energy use, enhances the effect of EMU performance improved sikyeoteum could see.

**Key Words** : braking speed, low speed, permanent magnet synchronous motor

### 1. 서론

제동기술에 있어서 회생제동의 사용 확대로 효과적인 에너지 사용을 추구할 수 있으며 정차까지의 전기제동뿐 아니라 고속영역에서 회생제동을 확대하는 기술의 개발로 제동력을 확보하고 기존방법 대비 제동력의 증가와 승차감에서 우수하다는 보고를 하고 있다[1].

전기제동의 회생전력은 직류모선의 전압을 상승시키게 되므로 직류모선의 전압이 상승하지 않도록 차량내부에 에너지를 저장하는 장치를 설치하던지 또는 직류모선이 이 회생전력을 흡수하는 능력을 가져야 한다. 완전 전기제동 방법은 이와 같이 회생전력을 처리하는 설비가 우선적으로 해결되어야 한다.

직접구동방식에 적용하기 위한 정지까지 전기제동에 있어서 정지순간은 매우 낮은 극저속의 상태이므로 회전자의 위치와 속도를 정밀하게 검출하는 센서기술이 요구된다. 또한, 정지순간 승차감을 고려한 토크의 제어기술이 필요하게 되며 본 논문에서는 축소모형 추진시스템에 적용하여 실험결과를 도출하였다.

영구자석형 동기전동기에 벡터제어를 적용하여 정지시까지 전기제동을 하였으며, 속도검출기는 레졸바를 사용하여 제어기에서 관측자에 의한 위치와 속도를 추정하는 방식을 사용하였다. 그리고 정지직전의 극저속에서 속도에 의한 제동 토크를 제어하는 방법으로 정지시까지 전기제동을 하였다. 그 결과 제륜자의 소모율 저감과 유지보수성을 증대시키고 소음 및 분진발생의 저감과 승차

\*Corresponding Author : Young-Choon Kim (Kongju National University)

Tel: +82-41-550-0281 email: [yckim59@kongju.ac.kr](mailto:yckim59@kongju.ac.kr)

Received November 27, 2012 Revised (1st December 20, 2012, 2nd December 31, 2012) Accepted January 10, 2013

감과 에너지 사용효과를 향상시켜 전동차의 성능을 향상 시켰음을 알 수 있었다.

## 2. 전동기와 관성부하장치

IC1M 견인시스템의 축소 시험장치에서 관성체는 차량의 가속특성을 고려하여 전동기의 정격회전속도  $\omega_n$  에 대한 가속시간을  $T_{acc}$  라고 하면 평균가속도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_n}{T_{acc}} \quad (1)$$

관성체의 운동방정식은 식 (2)가 된다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_e} \times T_m \quad (2)$$

여기서,  $J_e$  : 등가 관성체의 관성

$T_m$  : 전동기의 정격토크

축소형 추진시험장치의 관성은 식 (1)과 식 (2)에 의하여 식 (3)으로 계산된다.

$$J_e = \frac{T_m \times T_{acc}}{\omega_n} \quad (3)$$

회전체에 대한 중량은 식 (4)가 된다.

$$G = \sigma \times \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \delta \quad (4)$$

따라서, 회전체의 관성은 식 (5)로 계산된다.

$$J_e = \int_0^{\frac{D}{2}} 2\sigma\delta\pi x^3 dx = \frac{1}{8} GD^2 \quad (5)$$

여기서,  $G$  : 회전체의 중량

$D$  : 회전체의 직경

식 (3)의 관성은 식 (5)와 같은 크기가 되므로 전동기의 정격회전수와 정격토크 및 회전체의 가속시간이 주어지면 회전체의 관성을 계산할 수 있다. 실험장치에 사용된 전동기의 정격과 실험에서 최대속도는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\begin{cases} T_{max} = 71.2 [Nm] \\ \omega_n = 2\pi \times \frac{360}{60} = 37.68 [rad/s] \end{cases} \quad (6)$$

관성체는 정격회전수까지 가속하는 시간을  $T_{acc} = 8 [s]$  로 했을 때, 회전체의 관성은 식 (7)과 같은 관성이 필요하다.

$$J_e = \frac{T_m}{\omega_n} \times T_{acc} = 7.56 [Nm s^2/rad] \quad (7)$$

이 관성을 갖는 회전체는 장치의 크기 및 무게 등을 고려하여 식 (4)와 식 (5)에 의하여 계산한다. 회전체 재료의 비중은  $\sigma = 7.8$  로 계산하고, 식 (8)과 같이 정의한다. 또한, 전동기의 운전은 정격 토크에서 최대 토크의 범위로 가변하는 것으로 하였다.

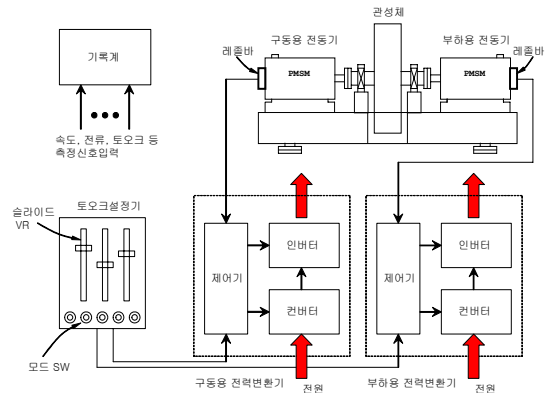
$$\begin{cases} D = 50 [cm] \\ \delta = 15 [cm] \\ G = 230 [kg] \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)에 의한 관성은 식 (9)와 같이 계산된다.

$$J_e = \frac{1}{8} GD^2 = 7.2 [Nm s^2/rad] \quad (9)$$

식 (8)에 의하여 제작된 부하 실험장치는 영구자석형의 동기전동기 2대로 각각 구동용과 부하용의 전동기로 사용하였으며, 구동용과 부하용 전동기의 사이에 관성체를 두었다. 전동기의 회전축에 각각의 위치를 검출하기 위해 레졸바를 장착하였다.

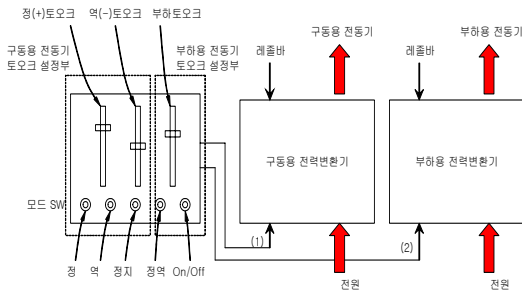
## 3. 축소모형 추진시스템



[Fig. 1] Small-scaled Test System

축소모형 추진시스템은 Fig. 1과 같이 구성하였다. 구동용과 부하용의 전동기에 각각 전력변환기를 연결하였고, 토오크 설정에 의하여 운전된다.

구동용 전력변환기의 토오크 설정방법은 Fig. 2에서 정 또는 역 방향의 모드 스위치의 위치(On 또는 Off)에 따라 해당하는 토오크의 슬라이드 값을 입력한다. 부하 전동기의 운전조건은 모드 스위치가 On인 경우에 해당되며, 정역 스위치가 On 또는 Off에 따라 정 또는 역 방향의 부하 토오크를 발생하도록 하였다.



[Fig. 2] Experimental Method of Small-scaled Test System

정 또는 역 방향의 모드 스위치의 위치에 따라 구동 전동기는 정방향의 운전 또는 역방향의 운전을 반복하게 되며 정지의 조건은 다음과 같다.

- ① 정방향으로 회전하고 있을 때, 역(-) 토오크가 설정되고 정지스위치가 On되면 전동기는 설정된 제동 토오크로 정지까지 운전한다.
- ② 역방향으로 회전하고 있는 경우 정(+) 토오크가 설정되고 정지스위치가 On되었을 때 정지까지 전기 제동을 하게 된다.

#### 4. 회전자 위치와 속도 검출기

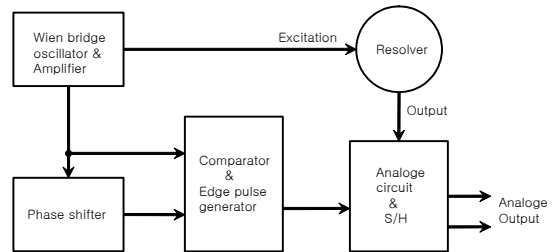
견인전동기를 차륜에 직결한 구조로 동기전동기를 사용할 때 저 분해능의 엔코더를 사용하는 경우 회전자의 위치를 정확하게 추정하는 기술이 사용되어야 하므로 본 논문에서는 레졸바를 사용하여 구현하였다.

레졸바는 전력변환기에 의하여 구동되는 전동기에 부착되어 누설자속 등에 의한 노이즈가 포함하는 신호를 출력하므로 노이즈를 제거하기 위한 필터와 차동입력회로를 필수적으로 사용해야 한다. 따라서 여자신호와 출력신호는 위상지연이 있게 되고 사용되는 필터의 전달함수에 관계없이 최대출력전압이 샘플링되어야 하지만 본 논문에서는 Fig. 3과 같은 블록을 사용하여 고정된 필터에

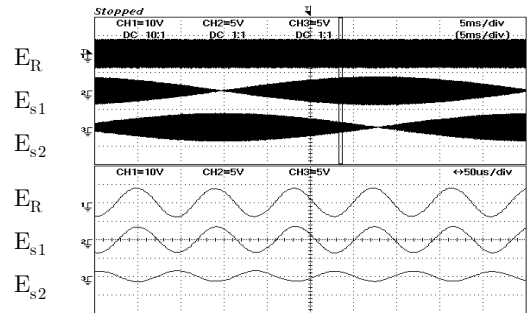
대하여 동작하는 회로를 설계하였다.

Fig. 4는 레졸바의 여자주파수를 11[kHz]로 했을 때 여자전압과 출력파형을 측정할 것이다. 하단은 상단의 일부분을 확대한 것이다.

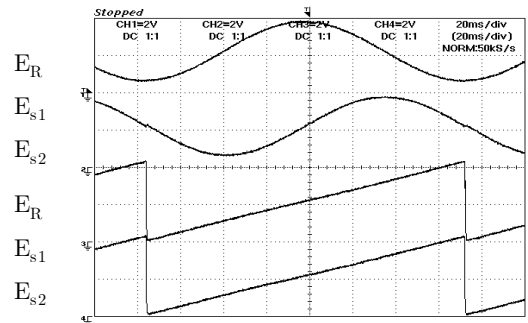
Fig. 3에서 제안한 방법에 의해 복조된 파형은 Fig. 5와 Fig. 6에서 상단 2개의 파형이며 3번째의 파형은 이들 두 개의 파형으로부터 계산한 회전자 위치를 측정하였다. Fig. 5는 정회전, Fig. 6은 역회전의 경우로 회전속도가 빠를 때와 늦을 때에 대한 파형이다.



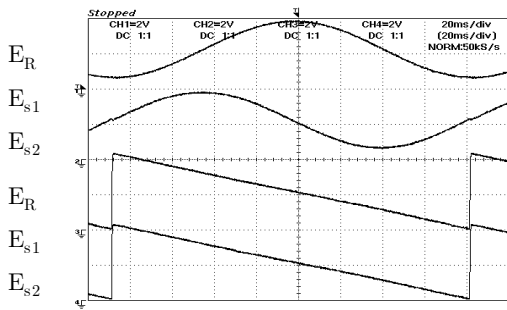
[Fig. 3] Resolver Signal Process



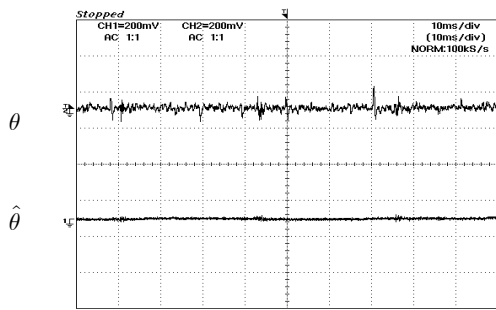
[Fig. 4] Excited Voltage and Output of Resolver



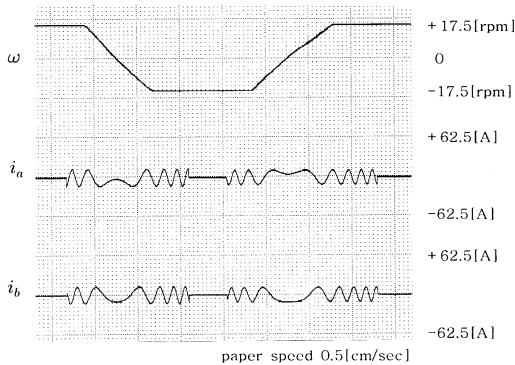
[Fig. 5] Position Estimation in the case of Normal Rotation



[Fig. 6] Position Estimation in the case of Reverse Rotation

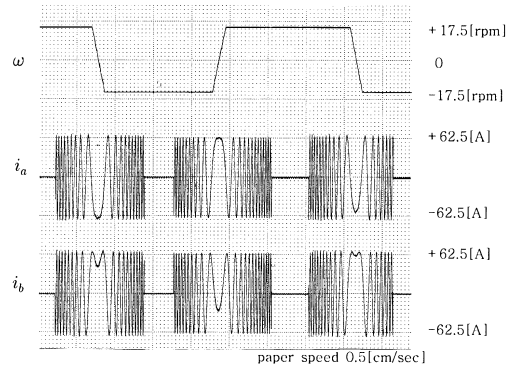


[Fig. 7] Calculated and Estimated Position



[Fig. 8] Speed Detect at Normal-Reverse (Low Acceleration)

Fig. 8과 Fig. 9는 극저속에 대한 속도의 검출결과를 측정된 것이다. 설정토크의 가변으로 가속도를 변화시키면서 정역운전할 때 추정속도를 17.5[rpm]의 범위로 확대하여 측정하였으며 회전속도가 빨라서 측정범위를 벗어난 경우는 최대측정범위로 제한하여 측정되도록 하였다. 이것으로부터 아날로그신호를 전송하여 제어기의 A/D변환기에 연결하는 방법에 있어서 필터와 차동입력 및 차동신호의 전송방법이 유용함이 확인할 수 있었다.

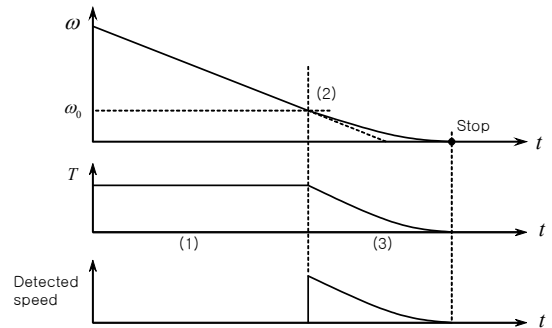


[Fig. 9] Speed Detect at Normal-Reverse (High Acceleration)

## 5. 전동기의 제동

전동기를 정지하는데 다음의 조건을 두는 것으로 하였다.

- ① 정지 후의 회전을 방지한다.
- ② 제동 토크가 0이 되는 점에서 공기 브레이크가 작동된다.
- ③ 구배 구간에 대하여도 제동 토크를 발생시키도록 하고 이 경우 ②의 공기 브레이크 기능과 합해진 제동력으로 정지시키는 것으로 한다.



[Fig. 10] Brake Sequence

위 조건에 대하여 정지하는 순간 전동기는 속도에 비례하는 식 (10)의 제동 토크를 발생한다.

$$T = k\omega \quad (10)$$

식 (10)과 Fig. 10의 (1)구간의 제동 토크가 같은 점인  $\omega_0$ 가 존재한다. 따라서 구간 (3)에서 감속하는 속도는 식 (11)과 같이 된다.

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{k}{J}t} \quad (11)$$

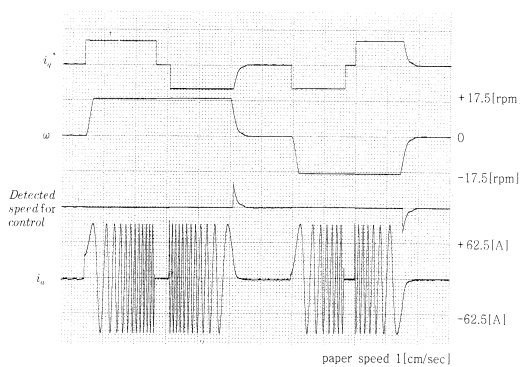
Fig. 10의 (2)점에서 토오크의 제어모드를 전환하여 전동기를 제어하여야 한다. 토오크 제어의 전환점은 감속을 위한 회생제동의 크기와 식 (10)에 의한 토오크가 같은 점이 되므로  $k$ 는 토오크의 전환점을 정하는 상수가 된다.

실제의 경우 작용하는 공기 브레이크의 동작은 응답에 지연이 있기 때문에 전동차에 응용할 때 토오크를 감소하는 시점에서 공기제동을 개시시키고 제동 토오크의 감소 기울기의 조절에 의하여 만족하는 승차감을 얻을 수 있는 상태를 실험적으로 찾아야 한다.

전동기는 식 (10)과 같이 속도에 비례하는 토오크를 발생하므로 전동기가 정지하면 더 이상의 움직임이 없으며 공기제동으로 정지력을 갖도록 하고 전력변환기의 회생을 off하면 제동이 완료된다.

Fig. 11은 전동기를 정역운전하면서 회생제동을 할 때 토오크의 감소를 개시하는 속도를 검지하여 속도에 비례하는 토오크로 정지시키는 측정파형이다.

Fig. 11에서  $i_q^*$ 는 토오크에 대한 전류의 설정값이다.  $\omega$ 는 속도검출기에서 추정된 속도를 저속범위로 확대한 파형이며 계측을 위하여 정역방향에 대하여 17.5[rpm]으로 기록을 제한하였다. 세 번째 파형은 속도에 비례하는 토오크로 제어하기 위하여 검지된 속도파형이며  $\omega$ 와 같은 배율로 측정된 것이다.  $i_a$ 는 전동기의 선전류를 측정된 것이다.



[Fig. 11] Brake od Motor

## 5. 결론

직접구동방식을 이용한 정지시까지의 전기제동은 정

지순간은 매우 낮은 극저속의 상태이므로 회전자 위치와 속도를 정밀하게 검출하는 센서기술이 필요하며, 이것은 정지순간의 승차감을 고려한 토오크 제어기술의 적용으로 해결할 수 있었으며, 본 논문에서는 축속모형 추진 시스템을 구성하여 실험하였다.

또한, 영구자석형 동기전동기에 벡터제어를 적용하여 정지시까지 전기제동을 하였으며, 속도검출기는 레졸바를 사용하여 제어기에서 관측자에 의한 위치와 속도를 추정하는 방식을 제안하였다. 그리고 정지직전의 극저속에서 속도에 의한 제동 토오크를 제어하는 방법으로 정지시까지 전기제동을 하였다. 그 결과 제동자의 소모물 저감과 유지보수성을 증대시키고 소음 및 분진발생의 저감, 승차감과 에너지 사용효과를 향상시켜 전동차의 성능을 향상 시켰음을 알 수 있었다.

## References

- [1] T. Suzuki, T. Koseki, S. Sone, "A Study on a Method of Train Automatic Stopping Control with a Pure Electric Brake", I.E.E. Japan Joint Technical Meeting on Transportation & Electric Railways and Linear Drive, TER-00-37 LD-00-64, pp. 15-18, July 2000.
- [2] K. Matatsuok, M. Kondo, Y. Shimizu, "Totally-Enclosed Type Traction Motor Using Permanent Magnet Synchronous Motor." IEEJ Trans. IA, Vol.124, No.2 pp 175-182,2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1541/ieejias.124.175>
- [3] K. Yoshida, "Development of Main Circuit System using Direct Drive Motor (DDM)", JR EAST Technical Review No.1-Autumn, pp.46-52,2002.  
<[https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf\\_1/46\\_52tecrev.pdf](https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_1/46_52tecrev.pdf)>
- [4] JL. Kovudhikulrungsri, T. Koseki, "Control of an Induction Motor for Pure Electric Brakes", I.E.E. Japan 2001 Japan Industry Applications Society Conference (JISAC2001), Vol. 3, pp. 1297-1302, August 2001.
- [5] K. Yoshida, K. Shimizu, "Innovations in Drive Motors (Summary of the Development of a Direct Drive Main Motor System)", JR EAST Technical Review No.5-Winter, pp.27-41, 2005.

김 영 춘(Young-Choon Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 대전공업대학교 전기공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 명지대학교 전기공학과(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차 부교수

<관심분야>

전기자동차전력변환, 전장제어, 하이브리드자동차