

## 영구 자석 동기 전동기의 초고속 운전에 관한 연구

金明浩<sup>†</sup>, 任正植<sup>\*</sup>, 薛承基<sup>\*\*</sup>, 林成一<sup>\*\*\*</sup>

## Implementation of Super High-speed Permanent Magnet Synchronous Machine Drive

Myoung-Ho Kim, Jung-Sik Yim, Seung-Ki Sul and Sung-Il Lim

## 요 약

최근 전력전자 기술의 발달로 전동기의 초고속 운전이 가능해졌고, 여러 가지 장점으로 인해 다양한 산업 분야에서 초고속 전동기가 활용되고 있다. 본 논문에서는 DSP와 IGBT 인버터로 제어되는 영구 자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor)를 118,000r/min으로 운전하는 제어 알고리즘을 제시하였다. 운전시 회전자의 위치와 속도를 얻기 위해 홀(hall) 센서를 사용하였으며, 홀 센서의 작은 분해능으로 인한 성능 저하를 줄이기 위해 속도 관측기를 사용하여 회전자의 각과 속도를 추정하여 이를 제어에 이용하였다. 고속 영역에서는 전동기의 출력을 높이기 위해 안티 와인드 업(anti-wind up)과 약자속 제어를 통합하여 수행하는 약자속 제어를 사용하여 운전 영역을 확대하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

## ABSTRACT

Recently, super high-speed motor drives have been available due to the development of power electronics technology. And they are used in various fields of industry because of their advantages. This paper describes the control algorithm for a permanent magnet synchronous motor(PMSM) drive at the speed of 118,000r/min using DSP and IGBT inverter. Hall sensors are implemented to measure the rotor position and speed, and a speed observer is used to reduce the performance deterioration caused by the low resolution of hall sensors. To enhance the output power capacity in the high-speed operating region, a flux weakening controller which also can work as an anti-wind up controller is used. Computer simulations and experiments are performed to validate the proposed method.

**Key Words** : Permanent magnet synchronous motor(PMSM), Hall sensor, Speed observer, Flux weakening control

## 1. 서 론

초고속 전동기는 고속 공작 기계, 터보 분자 펌프,

마이크로 가스 터빈, 터보 압축기, 고속 원심 분리기 등 산업 분야 여러 곳에서 사용되고 있다. 최근 전동기 제어 기술의 발달로 전동기의 최대 운전 속도가 높아졌고, 이에 따라 초고속 전동기를 사용하는 경우 시스템에서 가감속 변속기를 제거할 수 있게 되었다. 그 결과 시스템의 경량화, 소형화가 이루어졌고, 동시에 시스템의 에너지 변환 효율 또한 높아지게 되었다<sup>[1]</sup>.

초고속 전동기 운전시 백터 제어를 수행하기 위해서는 회전자의 위치 정보를 실시간으로 얻을 수 있어야

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, 서울대 전기컴퓨터공학부 박사과정

E-mail : myoungho@eepel.snu.ac.kr

<sup>\*</sup>정희원, 서울대 전기컴퓨터공학부 박사과정

<sup>\*\*</sup>정희원, 서울대 전기컴퓨터공학부 교수

<sup>\*\*\*</sup>정희원, 삼성테크윈(주) 책임연구원

접수일자 : 2008. 6. 16 1차 심사 : 2008. 7. 7

심사완료 : 2008. 7. 25

한다. 그러나 초고속 전동기의 경우 기계적 진동, 충격 및 전동기 자체의 기계적 구조의 제한으로 인해 일반적으로 널리 사용되는 레졸버(resolver)나 광학식 엔코더(optical encoder)를 사용할 수 없는 경우가 많다. 이러한 이유 때문에 각 센서 대신 관측기(observer)를 사용하여 회전자 위치를 추정하는 센서리스 제어 방법을 사용하기도 한다<sup>[2]</sup>. 센서리스 제어 방법은 센서를 전동기에 직접 부착할 필요가 없어 시스템의 기계적인 제약에 상관없이 전동기의 벡터 제어를 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 관측기가 가지고 있는 동특성으로 인해 전동기의 가속 성능에 제한이 생기고, 저속 영역에서는 관측기의 각 추종 성능이 저하된다는 단점을 가지고 있다.

특정 응용 분야에서는 전동기의 가속 성능이 주요한 성능 지표에 포함되기도 한다. 이 경우 홀(hall) 센서를 사용하여 위치 정보를 직접 얻는 방법을 사용한다. 그러나 홀 센서만을 사용하는 경우 위치 정보의 분해능(resolution)이 부족하기 때문에 전동기의 전류 리플이 커질 수 있으며, 이로 인해 전동기의 토크에도 맥동이 생길 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해, 홀 센서를 통해 얻는 각 정보를 보간(interpolation)해 주어야 한다.

또한 초고속 전동기 제어 시스템에서 전압 및 전류가 제한되는 고속 영역에서의 원활한 운전을 위해서는 약자속 제어가 필요하다. 약자속 제어가 원활하게 이루어지지 않으면 전동기가 출력 토크가 크게 제한될 수 있으며, 심한 경우에는 시스템이 불안정(unstable)해질 수도 있다.

본 논문에서는 전차원 속도 관측기(full order speed observer)를 통해 홀 센서의 각 정보를 보간하는 방법을 사용하여, 최대 운전 속도 116,000r/min의 초고속 전동기를 제어하였다. 또한 고속 영역에서의 약자속 운전을 위해 전류 제어기의 안티 와인드 업과 약자속 제어가 통합된 약자속 제어기를 이용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 속도 관측기와 약자속 제어기의 성능을 알아보았다.

## 2. 전체 시스템 구성<sup>[3]</sup>

그림 1은 본 논문에서 사용된 전동기 속도 제어 시스템을 나타낸다. 속도 제어기와 전류 제어기는 모두 비례적분(PID) 제어기로 구성되어 있으며, DSP를 이용하여 디지털로 구현되었다. 전력 변환 장치로는 직류 전압을 입력으로 받는 일반적인 PWM(Pulse Width

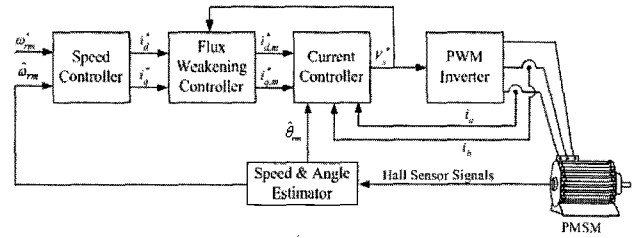


그림 1 전체 시스템의 구성  
Fig. 1 System overview

Modulation) 인버터가 사용되었다. PWM 인버터의 3상 출력을 위해 6개의 IGBT 소자를 스위치로 사용하였으며 2상의 상전류와 직류단 전압을 측정하기 위해 각각 전류 센서와 전압 센서가 사용되었다. PWM의 스위칭 주파수는 15 kHz이다. 전동기 회전자의 위치 및 속도를 측정하기 위해 홀 센서가 사용되었다. 회전자의 위치에 따른 홀 센서의 출력 신호는 속도 관측기에 입력되고, 속도 관측기는 입력된 신호를 이용하여 회전자의 위치 및 속도 정보를 계산하여 제어에 이용한다. 약자속 제어기는 전류 제어기의 출력 전압을 이용하여 전류 지령을 운전 상황에 맞게 변화시킨다. 속도 관측기와 약자속 제어기의 구성에 대해서는 3, 4장에서 자세히 설명하기로 한다.

## 3. 회전자 위치 및 속도 추정 방법

### 3.1 홀 센서를 이용한 위치 및 속도 추정

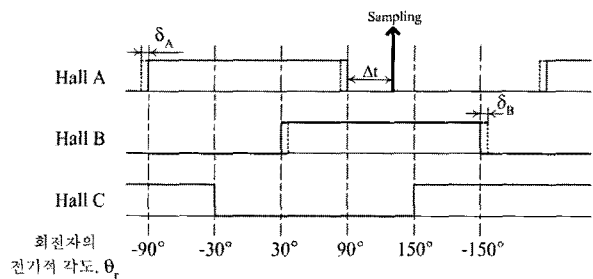


그림 2 홀 센서의 출력 신호

실선: 이상적인 출력 파형

점선: 센서 부착 위치에 오차가 있을 때의 출력 파형

Fig. 2 Output signals of hall sensors

Solid line : The Ideal output waveform

Dotted line : An output waveform with hall sensor installation errors

그림 2는 홀 센서의 출력 신호를 나타낸다. 3개의 홀 센서는 서로 120°씩 떨어져 부착되어 있고, 각각의 홀 센서는 회전자의 전기각 180°에 해당하는 범위만큼 신호를 출력한다. 이 경우 그림. 2에서 나타난 것처럼

전동기 회전자의 전기적인 1회전 당 6개의 위치 정보를 얻을 수 있다.

회전자의 전기적인 회전 속도  $w_r$ 의 추정치  $\hat{w}_r$ 은, 홀 센서 신호를 통해 얻은 6개의 위치 정보( $\theta_{hall}$ ) 사이의 시간  $\Delta t_{hall}$ 을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{w}_r = \frac{\pi/3}{\Delta t_{hall}} \quad (1)$$

이렇게 구한 회전자 속도  $\hat{w}_r$ 을 이용하여, 홀 센서 신호를 통해 얻은 회전자 각 정보  $\theta_{hall}$ 을 다음과 같이 보간 해줄 수 있다.

$$\hat{\theta}_r = \theta_{hall} + \hat{w}_r \cdot \Delta t \quad (2)$$

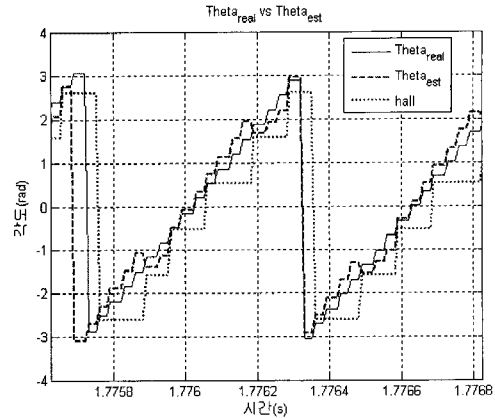
여기에서  $\Delta t$ 는 그림 2에 표시되어 있듯이 마지막으로 홀 센서 신호가 바뀐 시점과 각을 계산하는 시점 사이의 시간 차이를 나타낸다.

위의 식 (1), 식 (2)의 방법을 사용하면 간편하게 회전자의 전기적인 회전 속도를 구하거나, 홀 센서 신호를 통해 얻은 회전자의 위치를 구할 수 있다. 그러나 위의 방법을 통해 구한 회전자 속도나 위치 정보는 매 전기자 회전 주기마다 6번씩만 갱신될 수 있기 때문에, 회전자 속도가 변화하고 있는 경우 속도와 위치 정보에 맥동이 생기게 된다. 또한 홀 센서 설치 시 그림 2에 표시된  $\delta_A$ 나  $\delta_B$ 만큼의 위치 오차가 발생하는 경우에도 회전자의 속도와 위치 정보에 맥동이 발생하게 된다. 이렇게 발생한 맥동은 전동기의 제어 성능을 저하시킬 수 있다<sup>[4]</sup>.

그림 3은 홀 센서의 설치 오차가 있을 때 ( $\delta_A = \delta_B = 10^\circ$ ) 118,000r/min의 속도 지령으로 운전할 때의 시뮬레이션 파형이다. 그림 3 (a)는 회전자의 실제각과 추정각( $\hat{\theta}_r$ ), 홀 센서 신호 출력( $\theta_{hall}$ )을 나타낸다. 추정각과 실제각 사이에 맥동하는 오차가 나타난다. 그림 3 (b)는 속도 지령과 실제 속도, 추정된 속도( $\hat{w}_r$ )를 나타낸다. 추정 속도에 약 40,000r/min의 맥동이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 속도 지령을 제대로 추종하지 못하게 된다.

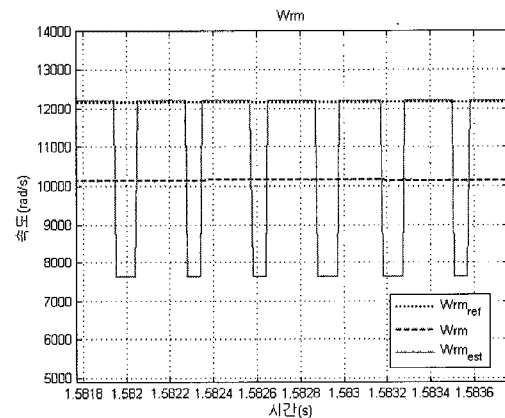
### 3.2 속도관측기를 이용한 위치 및 속도 추정

속도가 변동하거나 홀 센서의 부착에 오차가 있을 경우 발생하는 추정 오차의 영향을 줄이기 위해 전차원 속도 관측기를 이용한다<sup>[5]</sup>. 전동기의 기계 시스템을



(a) 실제각, 추정각과 홀센서 신호 출력

(a) Real angle, estimated angle and hall sensor output signal



(b) 속도 지령, 실제 속도와 추정 속도

(b) Speed reference, real speed and estimated speed

그림 3 홀 센서의 설치 오차가 있을 경우의 118,000r/min 운전시 시뮬레이션 - 홀 센서를 이용한 속도와 각 추정 결과

Fig. 3 Simulation result of 118,000r/min operation with hall sensor installation errors - speed and angle estimation with hall sensors

식 (3)과 같이 모델링하고 시스템의 상태 변수로 회전자의 각( $\theta_{rm}$ ), 속도( $w_{rm}$ )와 부하 토크( $T_L$ )를 설정하면 식 (4)와 같은 상태 변수에 관한 방정식을 얻을 수 있다. 이 때 부하 토크의 시간에 대한 변화는 매우 느리다고 가정하여  $\frac{dT_L}{dt} = 0$  으로 설정한다.

$$T_e = J \frac{dw_{rm}}{dt} + T_L \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{T}_L \\ \dot{w}_{rm} \\ \dot{\theta}_{rm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_m} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_L \\ w_{rm} \\ \theta_{rm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{pmatrix} T_e \quad (4)$$

식 (4)의 상태 방정식을 이용, 출력의 오차에 이득 행렬을 곱하는 상태 변수를 추정하는 페루프 관측기를 구성하면 그림 4와 같이 표현할 수 있다. 관측기의 입력으로 홀 센서 신호를 통해 얻은 회전자 각 정보 ( $\theta_{hall}$ )를 사용한다. 관측기는 3차이며, 관측되는 상태들은 각각 회전자의 기계적 위치, 속도, 외란 토크의 추정치라는 물리적인 의미를 갖는다. 그림 4의 3차원 관측기를 수식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

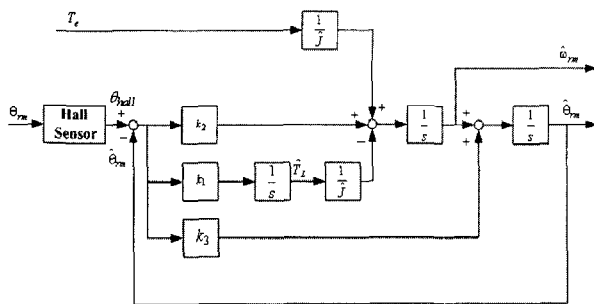


그림 4 속도 관측기의 구조  
Fig. 4 Block diagram of speed observer

$$\begin{pmatrix} \hat{T}_L \\ \hat{\omega}_{rm} \\ \hat{\theta}_{rm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\hat{J}_m} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{T}_L \\ \hat{\omega}_{rm} \\ \hat{\theta}_{rm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\hat{J}_m} \\ 0 \end{pmatrix} T_e + \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} (\theta_{hall} - \hat{\theta}_{rm}) \quad (5)$$

관측기의 입력인  $\theta_{hall}$ 은 전동기의 기계적인 1회전마다 6번씩 갱신되므로, 이를 순시적으로 표현하면 계단 모양의 파형으로 나타나게 된다. 관측기가 이 신호를 그대로 추종하는 경우 세 개의 관측 상태 모두에 동작 주파수의 6배에 해당하는 고조파가 발생하므로, 관측기의 동특성을 적절히 제한하여 이러한 고조파의 크기를 제한할 필요가 있다. 이 때의 고조파 리플은 전동기 자체의 토크-속도 방정식에서는 표현되지 않는 것이다. 따라서 관측기에서 전향 보상(feed forward)형인 전동기 출력 토크를 제외한 나머지 부분의 동특성을 알아볼 필요가 있다. 전향 보상을 제외했을 때( $T_e = 0$ ), 이 관측기의 전달 함수를 구하면 다음과 같다.

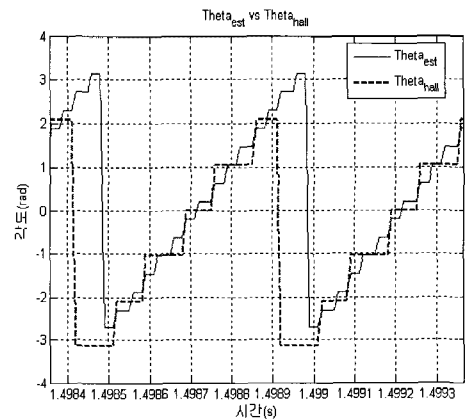
$$\left. \frac{\hat{\theta}_{rm}}{\theta_{rm}} \right|_{T_e=0} = \frac{k_3 s^2 + k_2 s - \frac{k_1}{\hat{J}_m}}{s^3 + k_3 s^2 + k_2 s - \frac{k_1}{\hat{J}_m}} \quad (6)$$

$$\left. \frac{\hat{\omega}_{rm}}{\omega_{rm}} \right|_{T_e=0} = \frac{s \left( k_2 s - \frac{k_1}{\hat{J}_m} \right)}{s^3 + k_3 s^2 + k_2 s - \frac{k_1}{\hat{J}_m}} \quad (7)$$

즉, 전동기 발생 토크( $T_e$ )의 영향을 고려하지 않으면 관측기는 저역 통과 필터와 같은 동특성을 보이게 된다. 따라서 관측기의 이득을 적절하게 조절하여 운전 주파수 6배의 고조파를 차단할 수 있다.

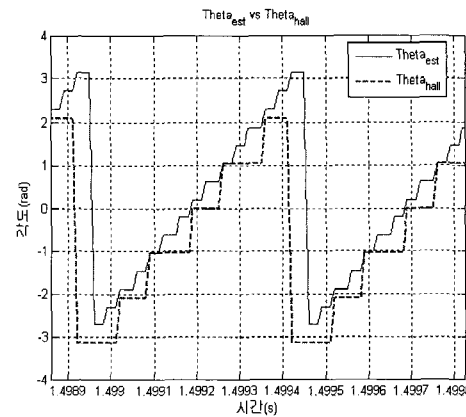
시뮬레이션을 통해 관측기의 성능을 알아보았다. 그림 5 (a)는 속도 관측기를 통해 얻어진 회전자 위치 정보를 나타내고 있다. 이를 통해 전차원 속도 관측기가 저역 통과 필터의 역할을 하고 있다는 사실을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

속도 관측기를 통해 추정된 위치 정보는 홀 센서 출력 신호의 중심점을 지나가게 된다. 홀 센서 신호 사이의 간격은  $\frac{\pi}{3}$ 이므로, 관측기 추정 위치 정보는  $\frac{\pi}{6}$ 만큼의 직류 오차를 가지게 된다. 정확한 각 추정을 위해 이 오차는 반드시 보상해주어야 한다.



(a)  $\frac{\pi}{6}$  보상 전

(a) Before compensation  $\frac{\pi}{6}$



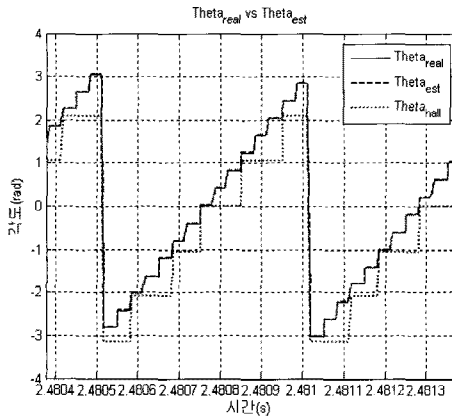
(b)  $\frac{\pi}{6}$  보상 후

(b) After compensation  $\frac{\pi}{6}$

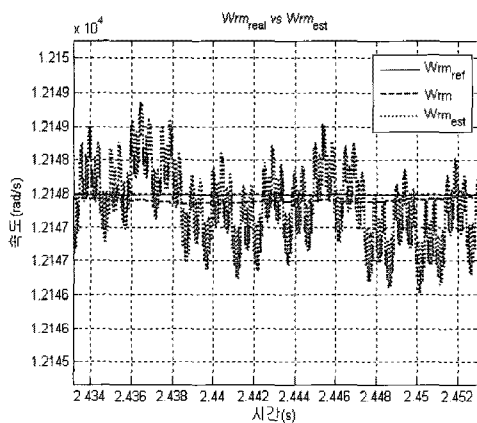
그림 5 속도 관측기를 통해 얻어진 회전자 위치 정보  
Fig. 5 Rotor position calculated by speed observer

그림 5 (b)는 이 오차를 보상에 준 결과를 나타내고 있다. 추정된 회전자 위치 정보가 홀 센서 출력 신호를 잘 추종하면서도, 홀 센서 신호들 사이의 간격을 잘 메우고 있다는 사실을 확인할 수 있다.

그림 6의 (a)와 (b)는 홀 센서에 설치 오차가 있을 경우의 추정된 회전자 위치와 속도를 나타낸다. 홀 센서 설치 오차의 크기는  $\delta_A = \delta_B = 10^\circ$  로, 그림 3의 경우와 같다. 이 때 그림 3과 비교하면 추정각과 추정속도의 맥동이 현저하게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이처럼 전차원 속도 관측기를 쓰는 경우, 홀 센서 설치 오차에 대해 보다 강인한 회전자 위치, 속도 정보를 얻을 수 있다.



(a) 실제각, 추정각과 홀센서 신호 출력  
(a) Real angle, estimated angle and hall sensor output



(b) 속도 지령, 실제 속도와 추정 속도  
(b) Speed reference, real speed and estimated speed

그림 6 홀 센서의 설치 오차가 있을 경우의 118,000r/min 운전시 시뮬레이션 - 속도 관측기를 이용한 속도와 각 추정 결과

Fig. 6 Simulation result of 118,000r/min operation with hall sensor installation errors - speed and angle estimation with the speed observer

### 4. 약자속 제어기의 구성

본 연구에서는 보다 원활한 약자속 제어를 위하여 전류 제어기의 안티 와인드업(anti-wind up)과 약자속 제어가 통합된 형태의 제어기를 사용하였다[6]. 그림 7은 본 연구에서 사용된 약자속 제어기의 구조를 나타낸다.

약자속 제어기는 전류 제어기의 출력 전압과 PWM으로 인한 전압 제한에 의해 발생하는 인버터 실제 출력 전압간의 오차를 궤환하여 전류 지령을 운전 상황에 맞게 수정한다. 속도가 증가하여 전류 제어기의 출력 전압이 전압 제한을 벗어나게 되면 d축 전류 지령을 음의 방향으로 증가시키게 된다. 이를 통해 약자속 제어를 수행함은 물론, 비례적분 제어기에 사용된 적분기의 누적 현상을 억제할 수 있게 된다.

그림 7의 오른쪽 아래의 고역 통과 필터(High Pass Filter, HPF)를 통한 궤환은 급격한 q축 전류 변동으로 인한 전압 부족을 방지하기 위해 사용되었다. 그림 7 왼쪽 아래의 점선으로 표시된 부분은 약자속 제 2영역에서의 제어를 위해 필요한 부분이다. 약자속 제 2영역에서 운전 상태가 단위 전압당 최대 토크(Maximum Torque Per Voltage, MTPV) 조건을 따라 움직이도록 MTPV 판별식을 이용하여 MTPV 조건을 벗어나면 q축 전류를 수정하여 운전 가능한 영역에서 동작하도록 한다.

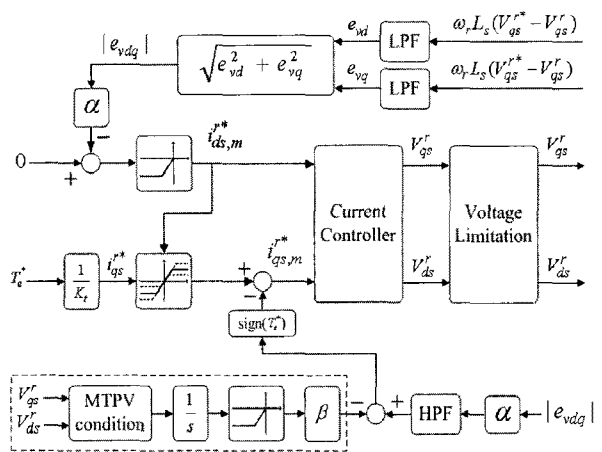


그림 7 약자속 제어기의 구조  
Fig. 7 Block diagram of the flux weakening controller

### 5. 실험 결과

앞서 설명한 속도 관측기와 약자속 제어기를 이용하여 가속, 감속을 하며 성능을 관찰하였다.

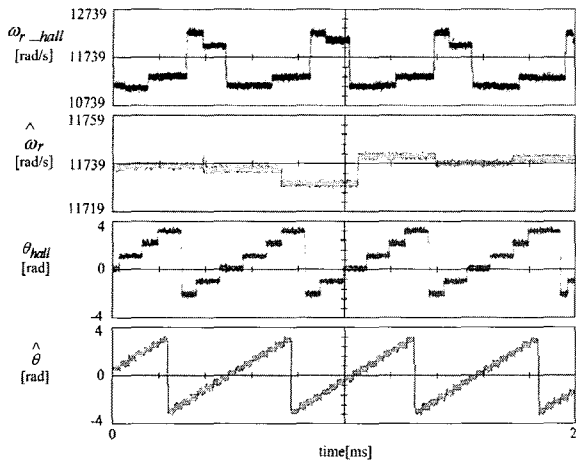


그림 8 112,100r/min 의 정상상태 운전 결과 - 홀 센서를 이용하여 계산한 속도와 속도 관측기의 출력 속도, 홀 센서 출력각과 속도 관측기 출력각  
 Fig. 8 Experiment result of 112,100r/min steady state operation - speed calculated by hall sensor and speed observer, angle calculated by hall sensor and speed observer

그림 8은 112,100 r/min 에서의 정상상태에서 홀 센서만을 이용하여 계산한 속도 및 각과 속도 관측기를 이용하여 계산한 속도 및 각을 나타낸다. 홀 센서만을 이용했을 때의 각 출력이 불균일한 것을 볼 수 있다. 이는 홀 센서의 부착 오차로 인한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 이를 이용한 속도 역시 맥동하게 된다. 반면 속도 관측기를 통해 얻은 속도 및 각은 보다 일정한 것을 볼 수 있다.

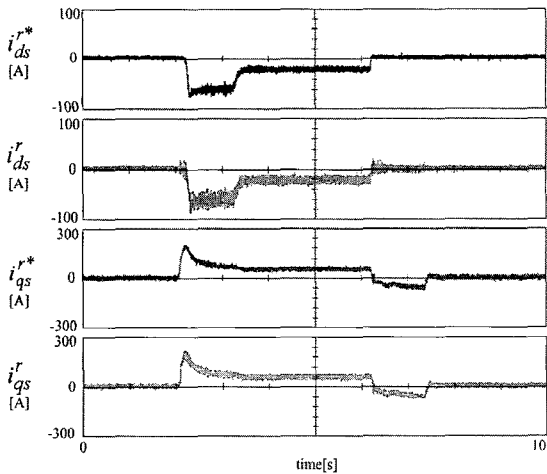


그림 9 가속/감속할 때의 d,q 전류 지령과 d,q 전류  
 Fig. 9 D,q axis current reference and currnet on acceleration and deceleration

그림 9는 가속/감속시의 d,q 전류 지령과 전류를 나

타낸다. 2초 부근부터 29,500 r/min 에서 112,100 r/min 까지 가속하여 정상상태에서 동작하다가 6초 부근에서 다시 29,500 r/min 으로 감속을 시작한다. 급가속으로 인해 약자속 1 영역을 거쳐 2 영역에 진입하고 정상 상태에서는 약자속 1 영역으로 돌아온다. 실험 결과를 통해 가속/감속 및 정상 상태에서 약자속 제어가 안정적으로 이루어짐을 확인할 수 있다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 홀 센서가 부착된 정격 속도 116,000 r/min의 초고속 동기 전동기를 전차원 속도 관측기와 약자속 제어기를 이용하여 제어하였다. 홀 센서의 출력 신호는 속도 관측기에 입력되고, 속도 관측기는 입력된 신호를 이용하여 회전자의 위치 및 속도 정보를 계산한 뒤 출력한다. 이러한 방법으로 추정된 회전자 위치 및 속도 정보는 홀 센서에 설치 오차가 존재하는 경우에도 실제 회전자 위치 및 회전 속도를 잘 추종할 수 있다. 약자속 제어기는 출력 전압을 이용하여 속도에 따라 운전 상황에 맞게 전류 지령을 수정하여 약자속 제어를 수행한다. 제안된 방법은 시뮬레이션 및 실험을 통해 안정적인 동작이 확인되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] M.A.Rahman, Akira Chiba, Tadashi Fukao, "Super High Speed Electrical Machines Summary", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2, pp. 1272-1275, 2004.
- [2] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong-Hyeck Kwon, Ji-Seob Byeon, "Implementation of sensorless vector control for super-high-speed PMSM of turbo-compressor", *IEEE Tans. Ind. Applicat.*, Vol. 39, pp. 811-818, 2003, May-June.
- [3] 설승기, 전기기기제어론, 홍릉과학출판사, 2장, 6장, 2002.
- [4] Beccue. P.B., Pekarek. S.D., Deken. B.J., Koenig. A.C., "Compensation for Asymmetries and Misalignment in a Hall-Effect Position Observer Used in PMSM Torque-Ripple Control", *IEEE Tans. Ind. Applicat.*, Vol. 43, pp. 560-570, 2007, March/April.
- [5] H. Kim et al., "A New Motor Speed Estimator Using Kalman Filter in Low-Speed Range", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 43, pp. 498-504, 1996, August.
- [6] 권태석, "영구자석 동기기의출력토크 향상을 위한 새로운 약자속 제어기", 박사학위 논문, 서울대학교, 2007.

저 자 소 개



**김명호(金明浩)**

1984년 1월 16일생. 2006년 한양대 공대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2008년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2008년~현재 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 박사과정.



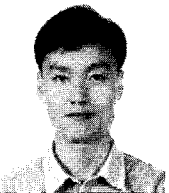
**임정식(任正植)**

1978년 4월 6일생. 2001년 서울대 전기공학부 졸업. 2003년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2003년~현재 동 대학원 전기컴퓨터공학부 박사과정.



**설승기(薛承基)**

1958년 5월 13일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학부 졸업(공박). 1986년~1988년 University of Wisconsin, Madison 연구원. 1988년~1990년 LG산전 책임연구원. 2003년~2004년 일본 Yaskawa Electric Corp. 연구소장. 1991년~현재 서울대 전기컴퓨터공학부 교수.



**임성일(林成一)**

1973년 11월 10일생. 1998년 창원대 공대 전자공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기전자제어공학부 졸업(석사). 2000년~2004년 영풍전자 개발연구원. 2004년~현재 삼성테크윈 책임연구원.