

레졸버를 이용한 IPMSM의 벡터제어 시스템

박내춘*, 김상훈*, 목형수**

*강원대학교, **건국대학교

Vector Control of IPMSM Using Resolver Sensor

N.C. Park*, S.H. Kim*, H.S. Mok**

*Kangwon National Univ., **Konkuk Univ.

ABSTRACT

영구자석 동기전동기의 고성능 제어를 위해서는 회전자 자극 위치에 대한 정확한 정보가 반드시 필요하다. 대부분의 전동기 제어 시스템에서는 증분형 엔코더 또는 레졸버를 사용하여 회전자의 위치를 검출한다. 레졸버는 내환경성이 좋고 엔코더에 비해 가격이 저렴하여 골프차와 전동지게차 같은 견인구동 시스템에 적합하다.

이 논문에서는 레졸버와 R/D 컨버터를 이용한 벡터 제어 시스템을 제안하고, 실험을 통해 성능을 확인한다.

1. 서론

가변속 서보 전동기는 초기에는 제어의 용이성으로 직류 전동기를 이용한 가변속 구동 시스템이 많이 사용되었지만 직류 전동기가 가지는 브러시와 정류자의 정기적 보수의 필요성, 회전자의 정류자편에 의한 최고 회전수 제한, 내환경성 등의 문제로 인해 교류 서보 전동기의 사용이 급격히 증가하고 있다.

유도 전동기는 다른 종류의 전동기에 비하여 구조적으로 튼튼하며 제작이 용이하다는 장점이 있으나 효율, 속응성 그리고 파워 밀도 등이 떨어지는 단점이 있다.

영구 자석형 전동기는 계자에 해당하는 자속 성분이 외부 전원에 의하지 않고, 영구자석에 의해 공급되어 전력 소모를 최소화하여 전체 시스템 효율의 향상을 기대할 수 있다.

영구 자석형 교류 서보 전동기는 표면 부착형 영구자석형 동기 전동기(Surface Mount Permanent Magnet Motor, SPMSM)와 매입형 영구자석형 동기 전동기(Interior Type Permanent Magnet Motor, IPMSM)로 구분 할 수 있는데, 매입형 영구자석형 전동기는 돌극성이 생기기 때문에 자기저항에 의한 토크가 발생하여 작은 회전자의 체적으로 큰 토크를 낼 수 있으며, 자석의 매입으로 인하여 기계적으로 튼튼하며, 유효 공극이 작아 전기자 반작용 효과가 감소하여 일정 토크 영역뿐만 아니라 일정 출력 영역까지 광범위한 운전 속도 범위에서 전동기의 운전이 가능하다. IPMSM은 이러한 장점으로 골프차나 전기자동차 등의 구동용 전동기로 호응을 받고 있다.

서보 모터의 정밀한 속도 및 위치를 제어하기 위해서는 샤프트 센서가 필수적으로 요구되며, 대표적인 샤프트 센서로는 엔코더와 레졸버가 있다.

레졸버는 먼지 등의 환경적 요인에 영향을 받지 않고, 넓은

온도 범위에서 사용 가능하다. 엔코더를 사용한 시스템에서는 전동기가 정지해 있는 경우 회전자의 위치를 알 수 없지만, 레졸버를 사용하면 정지시에도 회전자의 위치를 측정할 수 있고, 신호의 장거리 전송이 가능하며, 엔코더에 비해 가격이 저렴하여 많은 응용분야에서 사용되고 있다.

이 논문에서는 레졸버를 이용한 IPMSM의 벡터제어 시스템을 제안하고, 실험을 통해 성능을 확인한다.

2. IPMSM의 벡터제어 시스템^[1]

IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 있어 회전자 표면의 기계적인 구조는 대칭이지만 자기적으로는 q축과 달리 d축은 공극이 d축 자로에 존재하는 효과가 있다. 그러므로, 자석을 통과하지 않는 q축 자로에 비해 d축 자로의 자기저항이 크므로 q축의 인덕턴스가 d축보다 크다. 따라서 IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 회전자에 돌극성이 생기기 때문에, SPMSM과는 달리 자기저항 차이에 의한 토크가 발생하게 된다.

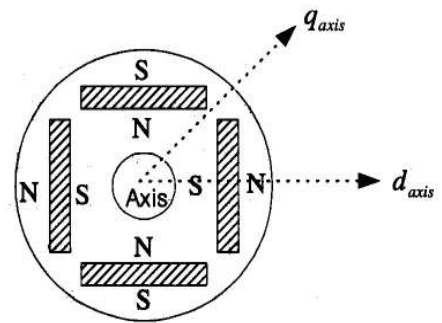


그림 1 매입형 영구자석 동기 전동기의 단면도
Fig. 1 Cross section of IPMSM

IPMSM의 회전자 자속 기준 동기좌표계 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r - w_r \lambda_{qs}^r + p L_{ls} i_{ds}^r + L_{md} (i_{ds}^r + i_{kd}^r + i_{fd}^r)$$

(1)

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + w_r \lambda_{ds}^r + p L_{ls} i_{qs}^r + L_{mq} (i_{qs}^r + i_{kq}^r)$$

(2)

⇒

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + p(L_d i_{ds}^r + \lambda_f) - \omega_r \lambda_{qs}^r \quad (3)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + p(L_q i_{qs}^r) + \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (4)$$

여기서 $\lambda_f = i_f \cdot L_{md}$ 이고, $L_d = L_{ls} + L_{md}$,

$L_q = L_{ls} + L_{mq}$, $\lambda_{qs}^r = L_q i_{qs}^r$, $\lambda_{ds}^r = L_d i_{ds}^r + \lambda_f$ 이다.

토크식은 다음과 같다.

$$Te = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [(L_{md} - L_{mq}) i_{ds}^r i_{qs}^r + \lambda_f i_{qs}^r]$$

(5)

이와 같은 이유로 골프차와 전기 자동차 같은 견인 구동 시스템에서 IPMSM의 사용이 증가 하고 있고, 이러한 응용분야에서는 내환경성이 좋은 레졸버를 사용하는 것이 유리하다.

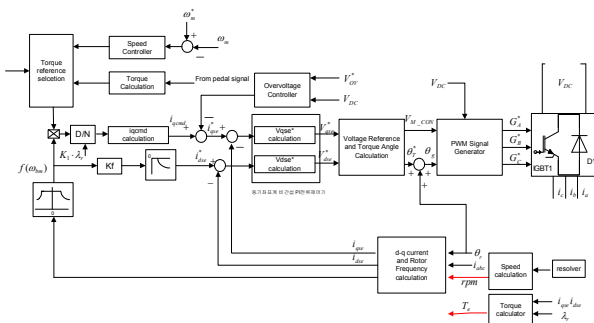


그림 2 IPMSM의 벡터 제어 시스템
Fig. 2 Vector control system of IPMSM

3. 레졸버

레졸버는 변압기 동작과 비슷하며 그림 3과 같이 1개의 회전자 권선과 2개의 고정자권선으로 구성된다. 2개의 고정자권선은 90° 위상차를 발생시키기 위해 구조적으로 배치되어 있으며 회전자권선에 1~10[kHz]의 정현파 신호(V_0)를 여자시키면 고정자권선에 각각 턴수비 및 회전자의 위치에 따라 사인 신호(V_1)와 코사인 신호(V_2)가 식(6), (7), (8)과 같은 관계로 유기된다.^[2]

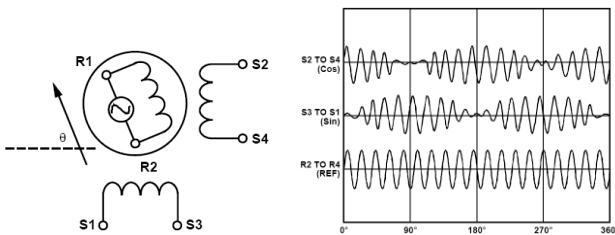


그림 3 레졸버 센서의 구성 및 신호
Fig. 3 Schematic and signals of resolver sensor

$$V_0(t) = \widehat{V}_0 \cdot \sin \omega_{ref} t$$

(6)

$$V_1(\phi, t) = \widehat{V}_0 \cdot k \cdot \sin \phi \cdot \sin \omega_{ref} t$$

(7)

$$V_2(\phi, t) = \widehat{V}_0 \cdot k \cdot \cos \phi \cdot \sin \omega_{ref} t$$

(8)

여기서 k는 레졸버의 턴수비, ω_{ref} 는 여자신호의 각주파수 [rad/sec], ϕ 는 회전자의 위치[rad].

4. 레졸버/디지털 컨버터

레졸버는 변위량을 아날로그 값으로 변환하며 이 아날로그 신호를 위치 신호로 사용하기 위해서는 신호를 디지털 값으로 변환해야 한다.

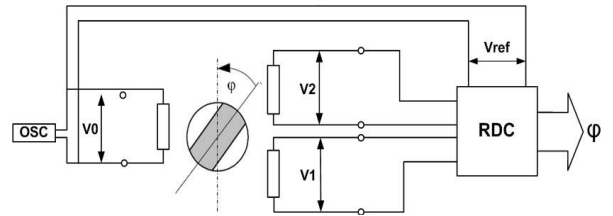


그림 4 R/D 컨버터 구성
Fig. 4 Schematic R/D Converter

레졸버의 아날로그 신호를 디지털 값으로 변화하기 위해서 사용되는 레졸버-디지털 컨버터(R/D 컨버터)는 속도 정보와 위치 정보를 2진 데이터로 변환하거나, 엔코더와 같이 90° 위상 차이의 A, B 펄스와 NM펄스로 변환하여 출력할 수 있다.

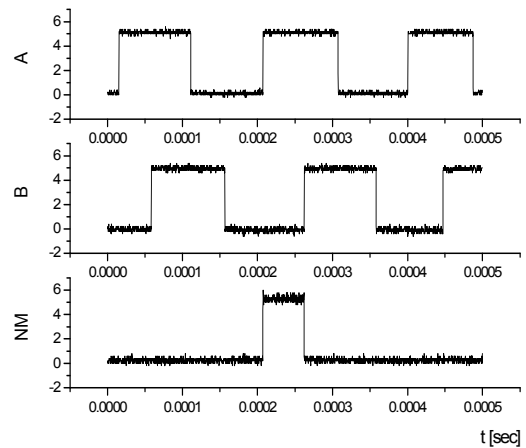


그림 5 R/D 컨버터의 엔코더 출력 펄스
Fig. 5 Encoder output pulse of R/D converter

4. 실험 결과

시스템 전체 운전과 제어를 위해 32비트 플로팅 포인트 연산 처리가 가능한 TI(Texas Instrument)사의 TMS320C32 (50MHz)를 사용하였고, 실험에 사용한 IPMSM의 정수는 다음 표와 같다.

표 1 IPMSM의 정수
Table 1 IPMSM parameters

Power [kW]	5
Number of Pole	4
Rated frequency [Hz]	60
Rated speed [rpm]	1800
Maximum speed [rpm]	4500
Rated Torque [N-m]	26.5
Maximum Torque [N-m]	79.5
Rated Voltage [V]	48
Rated Current [A]	69
Maximum Current [A]	207

레졸버의 고정자 권선 출력 파형은 그림 6과 같다.

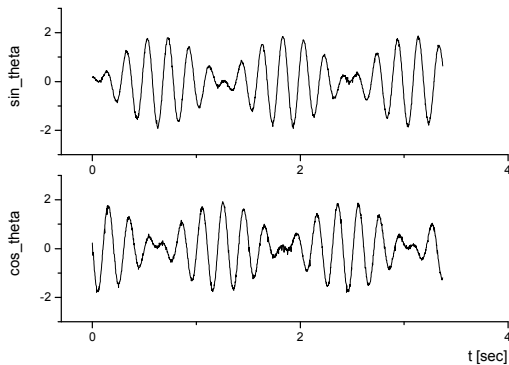


그림 6 레졸버의 출력 파형
Fig. 6 Stator current and resolver angle

레졸버를 이용하여 위치를 센싱 할 경우, 기계적인 구조의 불균형으로 인해 회전각에 DC offset이 존재하게 되어 제어 성능을 저하 시키게 된다. 따라서 정확한 제어를 위해선 offset 보상이 필요하다.^[3] 그림7은 offset 보상을 한 후 고정자 전류와 회전각을 나타낸다.

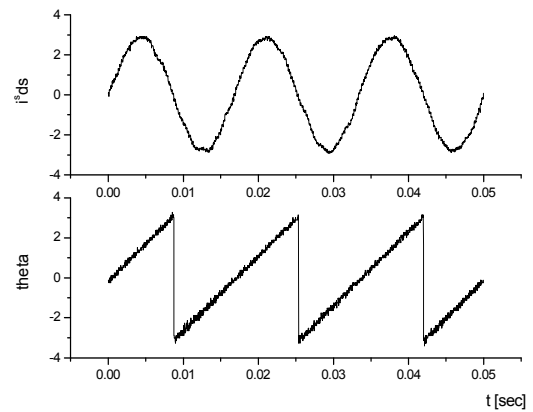


그림 7 고정자 전류 및 보상된 회전각
Fig. 7 Stator current and compensated resolver angle

제안된 시스템을 골프차에 적용하여 실험 하였고, 결과는 다음과 같다.

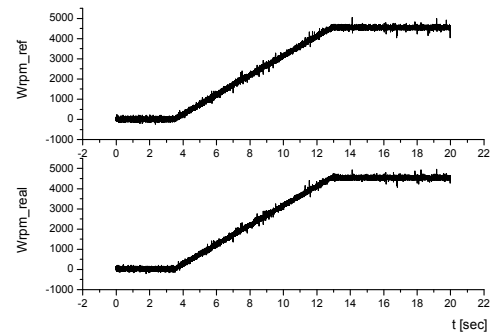


그림 8 4500[rpm]에서의 속도 지령치와 실제 속도
Fig. 8 Speed command and real speed at 4500[rpm]

5. 결론

본 논문에서는 레졸버를 이용한 IPMSM의 벡터 제어 시스템을 제안하였고, DSP(TMS320C32)를 사용하여 시스템을 구현하고 실험을 통해 결과를 확인하였다. 레졸버는 엔코더에 비해 진동 및 충격 등에 대한 내환경성이 우수하고, 넓은 온도범위에서 사용이 가능하여, 전기자동차와 골프차, 전동지게차와 같은 응용 분야에 적합하다.

참고 문헌

- [1] J.M. Kim and S.K. Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for Flux Weakening Operation", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 33, no. 1, Jan/Feb, 1997. pp. 43-48.
- [2] Kaewjinda Weera, Konghirun Mongkol, "A DSP - Based Vector Control of PMSM Servo Drive Using Resolver Sensor", *IEEE TENCON 2006.*, Nov. 2006., pp. 1-4.
- [3] M. Konghirun, "Automatic Offset Calibration of Quadrature Encoder Pulse Sensor for Vector Controlled Drive of Permanent Magnet Synchronous Motor", *IEEE TENCON 2005.*, Nov. 2005., pp. 1-5.

- [4] 김경화. “엔코더와 레졸버”, 전력전자학회, 전력전자학회지 제8권 제2호, 2003. 4, pp. 50~53.
- [5] M. Konghirun, "A Resolver - Based Vector Control Drive of Permanent Magnet Synchronous Motor on a Fixed-Point Digital Signal Processor" IEEE TENCON 2004. Vol. 4, Nov. 2004., pp. 167-170.