'94 대한전기학회 하계학술대회 논문집(1994, 7, 21~ 23)

공간전압벡터 PWM을 이용한 영구자석형 동기전동기의 서보제어 시스템

원의연*, 나상훈*, * 윤덕용**, 홍순찬*
*단국대학교 전기공학과 **천안공업전문대학 제어계측과

Servo Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Space Voltage Vector PWM

Euy-Youn Won*, Sang-Hoon Ra*, * Duck-Yong Yoon**, Soon-Chan Hong*
*Dankook University **Cheonan Technical Junior College

Abstract

This paper proposes a servo control system of SPMSM (Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) which essentially uses vector control method. The control system is composed of the PI controller for speed control and the current controller using space voltage vector PWM technique. The high-speed processing of algorithm for vector control and inverter switching for PWM is carried out by TMS320C31 DSP and IGBT module, respectively. The proposed scheme for 2.2kW SPMSM is verified through digital simulations and experiments, which show higher performance than that of traditional hysteresis current control technique.

1. 서 론

수치제어 공작기계나 산업용 로보트 등 정밀·속응제어가 요구되는 서보제어 시스템에는 대부분 직류전동기가 사용되어 왔으나 최근에는 점차 교류 서보전동기로 대체되어 가고 있다. 이와 같은 교류전동기의 서보시스템에 대한 적용은 벡터제어와 같은 현대적 제어기술의 발달과 고성능 마이크로프로세서 및 고속 대용량의 반도체 스위칭 소자의 실용화에 따라 가능하게 되었다.

그러나 교류 서보전동기의 가변속 제어에 적용되고 있는 벡터제어는 최근까지 그 연구개발이 거의 유도형 서보전동기에 집중되어 왔으며, 수 kW에서 수십 kW 이상의 중·대용량에 주로 사용되고 있다. 이에 비하여 희토류와 같은 우수한 자성재료의 발전에 힘입어 최근에 각광을 받고 있는 영구자석을 사용한 동기형 서보전동기는 효율 및 역률이 높고 소형 및 저관성으로의 제작이 용이한 장점을 가지고 있어서 산업용 기기와 같은 중·소용량의 속응·정밀제어용에 적용될 수 있게 되었다.[1][2]

본 연구에서는 회전자의 표면에 영구자석을 부착한 영구자석형 동기전동기(SPMSM)의 정밀 속도제어 시스템을 제안하고, 이를 TMS320C31 DSP 및 공간전압벡터 PWM 방식을 이용한 전류제어형 PWM 인버터를 사용하여 구현한다. 제안된 시스템은 디지탈 시뮬레이션 및 실험을 통하여 종래에 사용되던 저가형 히스테리시스 전류제어 방식에 비하여 매우 우수한 제어특성을 나타내는 것을 입증한다.

2. 동기전동기의 벡터제어

일반적으로 SPMSM에서는 회전자 영구자석의 전기저항이 매우 크고 비투자율이 거의 1이며 돌극성이 없으므로 직축 및 횡축 리액턴스가 거의 같다. 이제 전동기의 고정자 권선은 3상 Y결선 대칭분포이고, 공극의 기자력은 정현파이며, 고정자 철심의 자화특성이 선형이라는 일반적인 가정을 전제로 하여 고정자의 전압방정식을 동기속도로 회전하는 d,q 회전좌표계로 표현하면 다음과 같다.[3]

$$v_d = Ri_d + p\lambda_d - \omega_s\lambda_q \quad (1)$$

$$v_q = Ri_q + p\lambda_q + \omega_s\lambda_d \quad (2)$$

단, $\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{af}$ (3)

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4)$$

또한 돌극성이 없으므로 전기적 발생 토크는

$$T_e = \frac{3}{2}P[\lambda_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = \frac{3}{2}P\lambda_{af} i_q \quad (5)$$

로 표현되며, 시스템의 역학 관계는

$$T_e = T_L + Jp\omega + B\omega \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 또한 P를 극쌍수라 할 때 회전자 각속도는 동기 각속도와 $\omega = \omega_s/P$ 의 관계를 갖는다.

SPMSM에서는 식(5)처럼 쇄교자속이 일정하면 전동기의 발생토크는 q축 전류성분에 비례하며, 따라서 토크발생 전류성분(q축 전류)과 자속발생 전류성분(d축 전류)을 각각 독립적으로 제어한다면 타여자 직류전동기의 특성과 매우 유사하게 된다. 일반적으로 정격속도 이내에서는 q축전류를 가변하여 토크를 제어하며, 공극자속은 회전자의 영구자석에 의한 것만을 이용하고 d축전류를 0으로 유지하는 정토크제어를 사용한다.

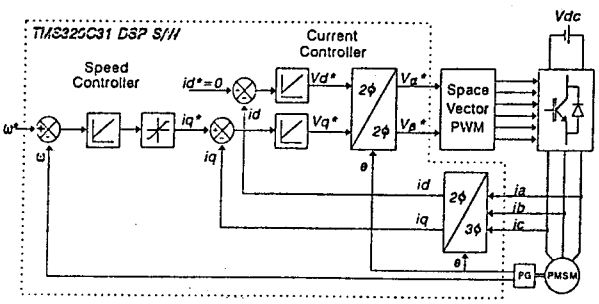


그림 1. 벡터제어 시스템의 블럭선도

이와 같이 영구자석형 동기전동기의 속도제어를 위한 벡터제어 블럭선도는 그림 1과 같다. 그림에서 전동기의 속도제어 시스템은 크게 두 부분으로 구성된다. 그 하나는 실제속도가 기준치를 추종하도록 하는 속도제어부로서 PI 제어기를 사용하였다. 즉, 기준속도 ω^*와 전동기에서 궤환된 실제속도 ω를 비교한 속도오차는 PI 제어기를 통하여 토크를 발생하기 위한 q축 전류가 되고, 이는 다시 전류제한기를 거쳐 q축 전류의 기준값 i_q^*가 된다. 속도제어 시스템을 구성하는 다른 하나는 전류제어부로서 속도제어부에서 유도된 토크를 발생하기 위하여 인버터를 스위칭함으로써 필요한 전류를 공급하는 부분이다. 이 전류제어부는 속도제어부에서 요구하는 충분한 성능을 만족시킬 수 있도록 동기 회전좌표계의 d축전류 및 q축전류에 대하여 각각 PI 제어기를 사용하였고, 인버터를 스위칭하기 위한 전압변조부는 공간전압벡터 PWM 기법을 사용하였다.

벡터제어를 위하여 고정자 정지좌표계의 3상 전류를 동기 회전좌표계의 d,q축 2상 전류로 변환하려면

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

의 관계를 사용하며, 동기 회전좌표계의 고정자 기준전압을 정지좌표계의 α, β축 2상 전압으로 변환하려면

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

의 관계를 사용한다.[4] 여기서 θ는 그림 2와 같이 3상 정지좌표계의 a상축(또는 α축)으로부터 동기 회전좌표계의 d축까지의 각으로 정의한다.

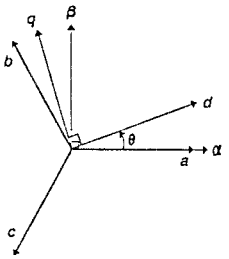


그림 2. 정지좌표계 및 회전좌표계

3. 공간전압벡터 PWM

전압형 인버터를 사용하여 전동기의 전류를 제어할 때는 일반적으로 펄스폭 변조(PWM) 방식을 이용하여 전압을 제어한다. 현재까지 전류제어기로는 히스테리시스 제어기, 델타 제어기, 삼각파 비교 제어기, 최적 PWM 제어기 등 여러가지 방식이 개발되어 왔으나 이것들은 응답특성, 스위칭 주파수, 출력전류의 고조파 함유율 등의 측면에서 아직 미흡한 점이 많다.[5][6] 그러나 공간전압벡터 PWM 방식은 많은 연산을 필요로 하고 복잡한 논리회로와 높은 스위칭 속도가 요구되나 이러한 단점을 상당히 개선할 수 있다.

3상 전압형 인버터에서 각 상의 스위칭 상태에 따라 출력전압은 8가지의 상전압 벡터를 가지게 되는데, 이를 복소평면상에 표시하면 $V(0)$와 $V(7)$은 영벡터이며 나머지 6개만이 유효벡터이므로 그림 3과 같이 정육각형을 형성한다.

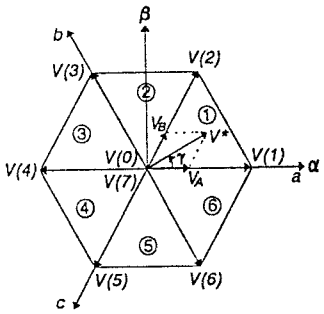


그림 3. 인버터의 출력전압 벡터

이제 인버터에 PWM을 수행하면 출력전압의 벡터는 시간에 대한 평균적인 의미에서 정육각형 내부의 어느 한 점에 놓이게 된다. 따라서 임의의 출력전압을 발생하려면 원하는 출력전압의 벡터가 위치한 삼각형의 두 변에 해당되는 전압벡터로부터 이 출력 지령전압의 벡터를 합성할 수 있고, 두 전압벡터의 인가시간의 합이 샘플링 주기 T_s보다 작으면 나머지 시간동안에는 영벡터를 인가하면 된다. 예를들어 지령전압 V^*가 0° ~ 60° 인 영역 ①에 존재한다면 V^*에 인접한 $V(1)$과 $V(2)$ 벡터에 투영된 V_A, V_B로 V^*를 합성할 수 있다. 이를 식으로 표현하면

$$V^*T_s = V(1)T_1 + V(2)T_2 \quad (9)$$

가 되는데, 여기서 T_1과 T_2는 각각 전압벡터 $V(1)$과 $V(2)$를 인가하는 시간을 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$T_1 = T_s \frac{|V^*|}{\frac{2}{3}V_{dc}} \frac{\sin(\frac{\pi}{3} - \gamma)}{\sin\frac{\pi}{3}} = \sqrt{3}T_s \frac{|V^*|}{V_{dc}} \sin(\frac{\pi}{3} - \gamma) \quad (10)$$

$$T_2 = T_s \frac{|V^*|}{\frac{2}{3}V_{dc}} \frac{\sin\gamma}{\sin\frac{\pi}{3}} = \sqrt{3}T_s \frac{|V^*|}{V_{dc}} \sin\gamma \quad (11)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (12)$$

여기서 γ는 이 삼각형의 출발변으로부터 전압벡터 V^*까지 반시계방향으로 회전한 각을 나타내며 $0 \le \gamma < \pi/3$ 이다. 그러나 지령전압의 벡터가 정육각형의 내부에 위치할 경우에는 이들 스위칭 시간이 유효하지만, 이를 벗어날 때는

$$(T_1 + T_2) > T_s \quad (13)$$

가 되어 한 샘플링 구간 동안에 정확한 출력전압을 발생할 수 없게 된다. 이와 같은 과변조의 경우에는 정육각형의 외부로 벗어난 지령전압 벡터를 방향은 그대로 유지하고 크기는 정육각형의 외변상으로 제한하여 스위칭 시간을 계산하면 가장 지령치에 근사한 출력전압을 얻을 수 있다.

3상대칭변조를 사용할 경우 영역 ①의 지령전압 V^*를 발생하기 위하여 인가하는 4가지 전압벡터 및 인가순서를 식으로 표현하면 다음과 같고 이 스위칭 패턴을 도시하면 그림 4와 같다.

$$V^*T_s = \frac{T_0}{2}V(0) + T_1V(1) + T_2V(2) + \frac{T_0}{2}V(7) \quad (14)$$

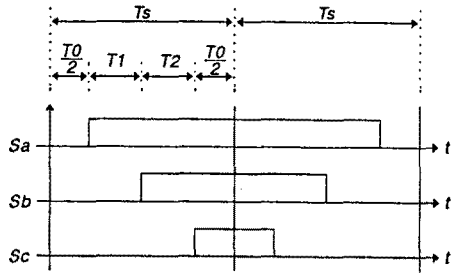
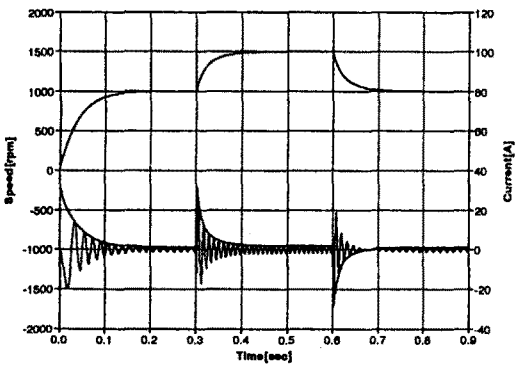


그림 4. 3상대칭변조법에 의한 인버터의 스위칭 패턴

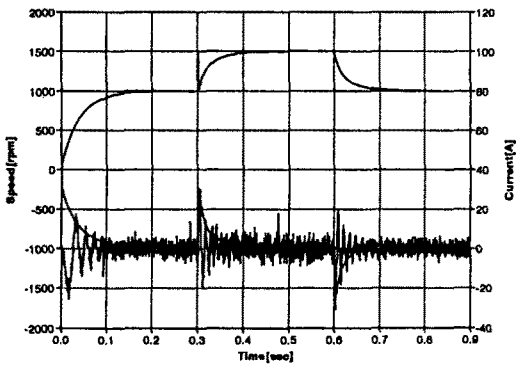
4. 디지탈 시뮬레이션

제안된 영구자석형 동기전동기 속도제어 시스템의 응답특성을 알아보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 샘플 영구자석형 동기전동기는 3상 220[V], 2.2[kW], 8극이며, 정격속도가 2000[rpm]이고, 고정자 권선의 상당 저항과 인덕턴스는 각각 0.1246[Ω] 및 1.3441[mH]이다.

시뮬레이션에는 식(1)~(6)으로 부터 상태변수 i_d, i_q, ω를 이용하여 전동기 모델을 표현한 식(15)~(17)과 $p\theta = \omega$의 관계를 사용하였다.



(a) 공간전압벡터 PWM 방식의 경우



(b) 히스테리시스 전류제어 방식의 경우

그림 5. 시뮬레이션 결과

$$pi_d = \frac{1}{L_d}(v_d - Ri_d + \omega_s L_q i_q) \quad (15)$$

$$pi_q = \frac{1}{L_q}(v_q - Ri_q - \omega_s L_d i_d - \omega_s \lambda_{af}) \quad (16)$$

$$p\omega = \frac{1}{J}(T_e - T_L - B\omega) \quad (17)$$

무부하 상태로 $t=0$[sec]에서 기준속도 1000[rpm]으로 스텝 기동하고, $t=0.3$[sec]에서 이를 1500[rpm]으로 가속하였다가, 다시 $t=0.6$[sec]에서 1000[rpm]으로 감속한 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 5에 보였다. 전동기의 속도가 기준속도를 잘 추종하고, 히스테리시스 전류제어 방식에 비하여 출력전류 파형에 고조파 성분이 매우 적은 것을 볼 수 있다.

5. 실험결과 및 검토

본 논문에서 제안한 서보제어 시스템의 구성을 그림 6에 보였다. 시스템의 모든 제어 알고리즘은 32비트 부동소숫점 DSP인 TMS320C31에 의해 실시간으로 처리되며, 제어 프로그램은 모두 어셈블리어로 작성되고 IBM PC 486에 장착된 XDS-500 에뮬레이터를 통하여 다운로드된 후 실행된다.

전력회로는 컨버터에 800[V]/40[A] 용량의 다이오드 모듈을 사용하고 인버터에 600[V]/75[A] 용량의 IPM(Intelligent Power Module)을 사용하여 간결하게 구성하였으며, 인터페이스 회로는 고집적 EPLD로 구현하여 컴팩트한 설계가 가능하였다. 출력 상전류 및 직류링크 전압을 측정하기 위하여 12비트 A/D 변환기 2개를 사용하고, 전동기의 속도 및 회전자 위치를 측정하기 위하여 분해능 6000[PPR]인 광학식 로터리 엔코더를 사용하였다. 속도측정은 M/T 방식을 사용하고 샘플링 주기는 2[ms]로 하였으며, 전류 샘플링 주기는 100[μs]로 하였으므로 인버터의 스위칭 주파수는 5[kHz]가 된다.

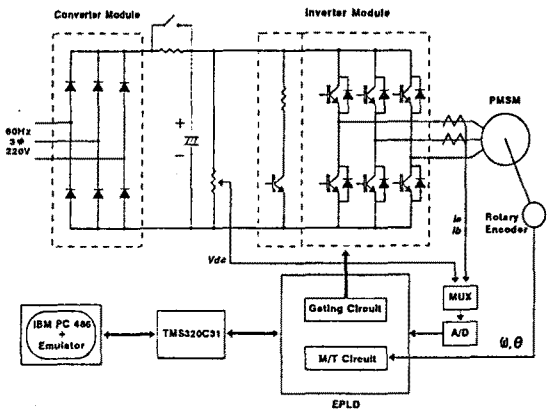
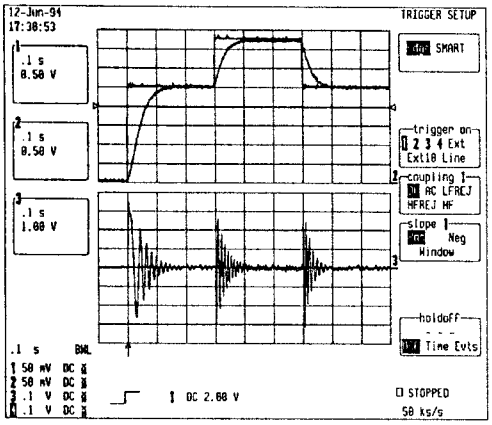
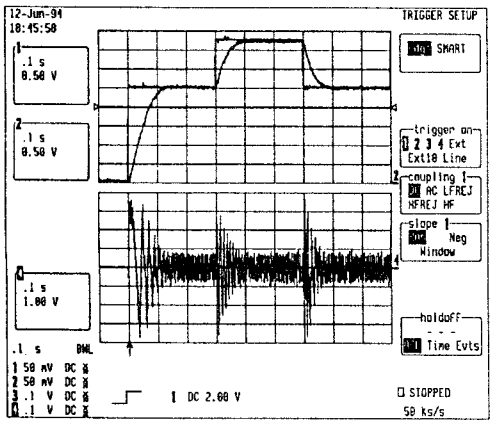


그림 6. 시스템의 구성 블럭도

그림 7은 시뮬레이션에서와 같이 무부하 상태로 $t=0$[sec]에서 기준속도 1000[rpm]으로 스텝 기동하고, $t=0.3$[sec]에서 이를 1500[rpm]으로 가속하였다가, 다시 $t=0.6$[sec]에서 1000[rpm] 으로 감속한 경우의 실험결과 파형이다. 그림에서 기동시간이 약 100[ms]로 이것은 시뮬레이션 결과와 일치하며, 전동기의 속도가 기준속도에 잘 추종하고, 출력전류 파형에 고조파 성분이 매우 적은 것을 볼 수 있다.



(a) 공간전압벡터 PWM 방식의 경우



(b) 히스테리시스 전류제어 방식의 경우

그림 7. 기동특성 및 가변속 응답특성 실험 결과

6. 결 론

본 논문에서는 회전자의 표면에 영구자석을 부착한 영구자석형 동기전동기에 대하여 벡터제어에 의한 속도제어 시스템을 제안하였다. 속도제어부에는 PI 제어기를 사용하였으며 전류제어부에는 공간전압벡터 PWM을 사용하였고, 고속연산 및 인버터 스위칭을 위하여 각각 TMS320C31 DSP와 IGBT 모듈인 IPM을 사용함으로써 고성능의 컴팩트한 시스템을 설계하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행해 본 결과, 제안된 시스템은 서보제어용으로서 매우 우수한 응답특성을 보이며, 부하전류의 고조파 성분이 종래의 히스테리시스 제어방식에 비하여 매우 적은 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 박민호, 원충연, "서어보 運轉을 위한 전력변환기 및 제어이론", 전기학회지, 제36권 9호, pp.17~31, 1987.9.

[2] 이민명, "특수 동기전동기", 전기학회지, 제42권 12호, pp. 52~64, 1993.12.

[3] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I : The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-25, No. 2, pp.265~273, Mar./Apr. 1989.

[4] Peter Vas, Vector Control of AC Machines, Oxford University Press, 1990.

[5] 이동춘, 김영렬, 설승기, "IGBT 인버터-유도전동기 구동시스템을 위한 전류제어기의 특성 연구", 전기학회 논문지, 제43권, 제2호, pp.215~224, 1994.2.

[6] P. Freere and P. Pillay, "Design and Evaluation of Current Controllers for PMSM Drives", IEEE IECON '90 Proc., pp.1193~1198, 1990.

[7] S. Ogasawara, H. Akagi, and A. Nabae, "A Novel PWM Scheme of Voltage Source Inverters Based on Space Vector Theory", EPE '89, pp.1197~1202, 1989.

[8] Texsas Instruments, TMS320C3X User's Guide, 1992.

[9] Intelligent Power Module PM75RHA060 Data Sheet, Mitsubishi, 1992.10.