

전류제어 알고리즘에 의한 동기모터의 속도제어

Speed Control for Synchronous Motor Using the Current Control Algorithm

변정환 · 정석권

J. H. Byun and S. K. Jeong

Key Words : Synchronous Motor(동기모터), Speed Control(속도제어), Current Control Algorithm(전류 제어 알고리즘), DSP(Digital Signal Processor)

Abstract : It is not easy to control the speed of AC motors accurately without modeling with some parameters for the controlled system. However, there are some application parts which do not require high speed responses strictly and the motor parameters can not to be identified simply. In this paper, a speed control method for a synchronous motor(S.M) with unknown parameters of the motor is investigated. The method is based on the current control algorithm. Speed controller and current controller are designed using PI control law. Some experiments are performed using DSP and power expert system to prove the validity of the proposed method. Throughout experimental results, the method is confirmed successfully. This method is expected to control the system with unknown parameters of the S.M efficiently.

1. 서 론

속응성이 요구되는 서보용 AC 모터의 속도제어는 대상 시스템을 회로방정식으로 모델링하고 모터의 파라미터를 구하여 벡터제어를 행하는 것이 일반적이다^{1,2)}. 제어대상에 대한 정확한 모델링이 어려운 경우에는 대상을 하나의 미지 플랜트로 간주하여 입·출력 관계에 의한 시스템 동정을 실시한 후 각종의 제어칙들을 적용시키는 방법도 널리 사용되어지고 있다³⁾. 후자는 속응성면에서는 전자에 뒤지나 모터의 파라미터를 구해야 하는 번거로움을 피할 수 있고 다양한 제어이론의 탐색이 용이하므로 속응성이 그다지 요구되지 않는 분야에 자주 이용되고 있다.

본 연구에서는 제어계의 특성상 속응성은 그다지 엄격하게 요하지는 않으나 제어대상의 파라미터 추정이 어려운 경우를 상정한 동기모터의 속도제어의 한 방안을 검토한다. 실험에 사용된 제어대상은 모터와 발전기의 역할을 동시에 겸하도록 특수하게 설계, 제작된 프로토타입의 장치로서 속도

제어계 구축시 그 파라미터의 추정이 용이하지 않다. 다만, 구동원리면에서는 스테이터(stator)측이 전기자 역할을 하고, 로터(rotor)측이 전자석인 회전계자형 전자석 동기모터와 동일하다. 본 연구의 목적이 속도제어에 초점을 맞추고 있으므로 구동원리면에 주목하여 이하에서는 이 장치를 동기모터로 간주한 속도제어 방안을 보인다. 검토된 방안은 전류제어 알고리즘에 의한 제어법으로서 전류 피드백에 의한 속도 서보를 실현하는 방법이다⁴⁾.

2. 동기모터의 제어 원리

2.1 구동 원리

일반적으로 동기모터는 무부하시나, 부하시에도 회전수는 식(1)에 따르며, 부하에 의해 그 특성이 변하지 않는 것이 특징이다.

$$N_s = \frac{120f}{p} [rpm] \tag{1}$$

여기서, N_s 는 동기속도, p 는 자극수, 그리고 f 는 전원주파수[Hz]이다. 이 특징은 동기이탈이 일어나지 않는한 유지된다. 식(1)에서 극수 고정시 전원주

접수일 : 1999년 4월 26일
변정환 : 부경대학교 산학협동연구센터
정석권 : 부경대학교 해양산업개발연구소

파수가 일정하면, 회전수는 일정하게 유지되므로 동기모터는 부하의 대소에 관계없이 정속도가 요구되는 분야에 널리 사용되어져 왔다. 또한, 최근의 파워일렉트로닉스 분야의 기술발전에 힘입어 가변주파수, 가변전압원도 비교적 용이하게 얻을 수 있기 때문에 로터측을 영구자석으로 하는 동기모터는 현재 가변속 서보 모터로서도 널리 사용되어지고 있다. 다만, 본 장치는 대부분의 가변속 동기 모터가 로터측을 영구자석으로 하는 영구자석식 동기모터인데 반해 전자석을 계자극으로 하는 회전계자형 전자석 동기모터인 점이 특징이다. 따라서, 속응성의 면에서는 로터가 영구자석인 BLDC(Brushless DC) 동기모터에 뒤지며, 구조적으로도 더 복잡하고, 대형화 되는 반면, 장치의 대응량화는 비교적 용이하다.

2.2 전류제어 알고리즘

Fig. 1은 본 연구에 사용된 회전좌표계로서 모터 외부의 정지좌표계로부터 로터와 동일한 운동을 하고 로터의 자속과 평형 및 수직한 두 축을 갖는 좌표계이다. 그림(b)에서 d 축은 그림(a)의 3상교류(u, v, w)를 2축으로 변환했을시의 회전자의 자속방향(N 극 방향)을 나타내고, q 축은 d 축과 직교하는 방향으로 설정된다. 통상 q 축의 방향은 정(E)방향의 토크를 발생하는 자속 방향을 q 축 방향으로 설정한다. N 극의 방향은 로터의 회전과 동일한 각속도로 회전하므로 정지계로부터 보면, 그림(b)의 좌표계는 로터에 동반하여 회전하는 회전좌표계로 된다.

자속 ϕ_u, ϕ_v, ϕ_w 의 값을 각각 양의 값으로 하는 상전압(v_u, v_v, v_w)과 상전류(i_u, i_v, i_w)를 양의 방향으로 각각 정하면, u, v, w 계와 d, q 계는 다음식에 의해 상호 변환 가능하다.

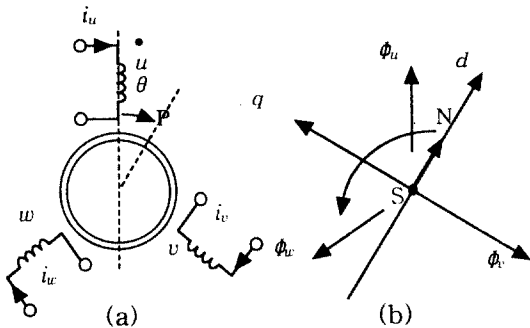


Fig. 1 Rotating coordinate system with d-q axis

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2)$$

평형 3상회로에서는 일반적으로 $i_v = -(i_u + i_w)$ 가 만족되므로, 위식은 임의의 2상 전류치만을 이용하여 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{1}{2}} \sin \theta + \frac{3}{2} \cos \theta & -\sqrt{2} \sin \theta \\ \sqrt{\frac{1}{2}} \cos \theta + \frac{3}{2} \sin \theta & \sqrt{2} \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_w \end{bmatrix} \quad (3)$$

전류연산 결과로부터 지령될 상전압도 위식과 동일한 방법으로 d, q 축 전압에 대한 역변환을 통해 식(4)와 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} \cos \theta - \sqrt{\frac{1}{2}} \sin \theta & -\sqrt{\frac{1}{6}} \sin \theta - \sqrt{\frac{1}{2}} \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

나머지 상전압 지령 v_v 는 $v_v = -(v_u + v_w)$ 로부터 쉽게 구해진다.

한편 식(3)에서 얻어진 전류의 d 축, q 축 성분 가운데 토크에 기여하는 성분은 q 축 성분뿐이다. d 축 성분은 자속 ϕ 에 평행한 성분으로서, 토크 $T = I \times \phi$ (\times 는 vector product)로 표현되므로 전류 I 의 ϕ 에 평행한 성분은 토크 T 에 영향을 끼치지 않기 때문이다. 따라서 d - q 좌표계에 있어서 전류 제어는 다음의 (5)식으로 간단히 요약된다.

$$\begin{aligned} i_d^* &= 0 \\ i_q^* &= kT^* \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 i_d^*, i_q^* 는 회전좌표계상에서 속도제어를 통해 지령될 지령전류치를, k 는 비례계수를 각각 나타낸다. 윗첨자 '*'는 지령치를 나타낸다.

Fig. 2에서와 같이 모터에 흐르는 상전류(i_u, i_w)를 d - q 좌표계로 변환한 복소전류 \mathbf{i} 가 지령전류치 \mathbf{i}_c 에 대해 \mathbf{i}_e 만큼의 편차가 발생한 경우, 제어계

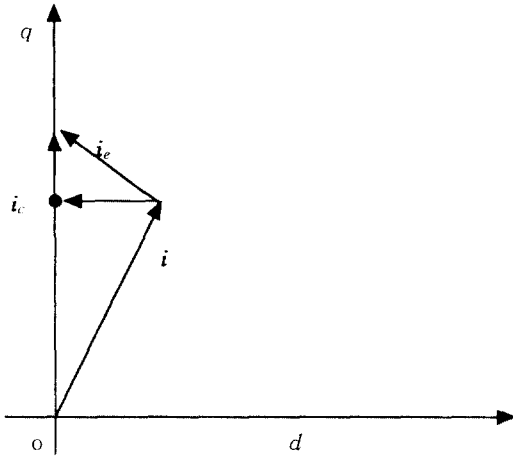


Fig. 2 Current control in d - q axis

는 $i_e = 0$ 이 되도록 보정할 필요가 있다. 비례 제어만으로 이를 보정한다고 가정하면, 출력 전압지령은 비례계수를 k_p 로 해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_c = k_p(i_c - i) \tag{6}$$

위식에서 굵은 체(bold type)의 문자표기는 d, q 축의 성분을 포함한 복소벡터임을 의미한다. 만일, 속도제어를 PID (Proportional, Integral, Differential) 제어로서 실현한다면, 이에 상응한 토크지령치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i^* = k_p(v_i^* - v_i) + k_i \int (v_i^* - v_i) + k_d(v_{i-1} - v_i) \tag{7}$$

여기서, T_i^* 는 토크지령치, v_i^* 는 속도지령치, v_i, v_{i-1} 은 현재속도 및 한 샘플링 이전의 속도를 각각 나타내고 있다. 또한, k_p, k_i, k_d 는 PID의 비례, 적분, 미분계인을 각각 나타낸다. 결국, 전류제어 알고리즘은, 속도지령 및 검출된 속도정보로부터 식(7)에 의거 토크지령을 우선 연산한다. 다음, 토크지령치로부터 식(5)에 의거 전류지령을 연산한다. 마지막으로, 전류지령치 및 관측전류로부터 식(6)에 의거 전압지령을 연산한 후 이를 (4)식에 의한 상전압 지령으로 변환시켜 출력한다.

Fig. 3에 전류제어 알고리즘에 근거한 제어계의 블록도를 보인다. ω_r^* 는 속도지령(rpm)으로부터 변환된 각속도 지령을 의미하며, S-servo, C-servo는 속도 및 전류서보 블록임을 각각 나타낸다. 장치로부터 검출되는 정보는 두 상의 순시전류치와 엔코더로부터의 각도정보이다.

제어계는 서론에서 전제된 바와 같이 속응성을 그다지 요하지 않는 관계로 PI제어기만을 사용하고, PI계수는 반복시행(trial and error)으로 구해진다.

3. 제어계의 구성

3.1 제어계의 하드웨어 구성

Fig. 4는 동기모터의 속도제어를 위한 하드웨어 구성을 보인다.

컨트롤러는 유연성이 뛰어난 DSP(TMS320C32, 50MHz) 베이스의 P/E(Power Expert)시스템을 사용하였고 이에 관한 상세는 Fig. 5에 나타나 있다. 사용된 DSP는 1 명령(instruction) 수행시간이 40 [ns]로서 부동소수점 처리가 가능한 고속연산 소자이다.

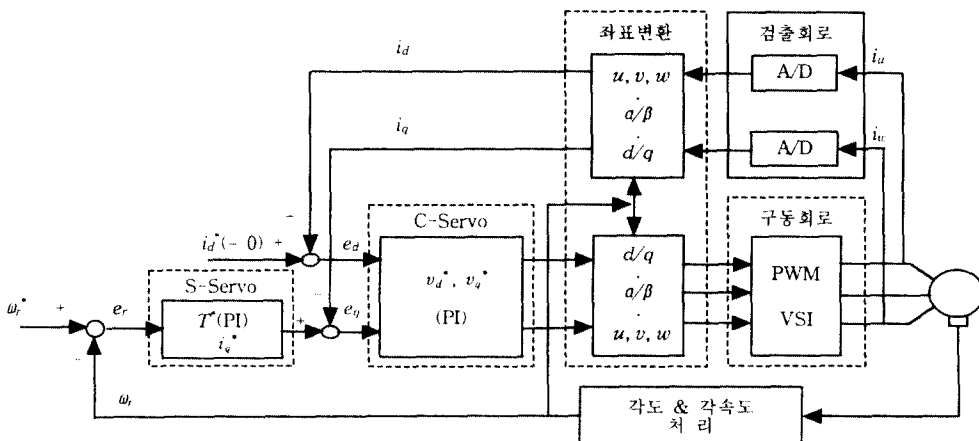


Fig. 3 Block diagram of the S.M speed control system

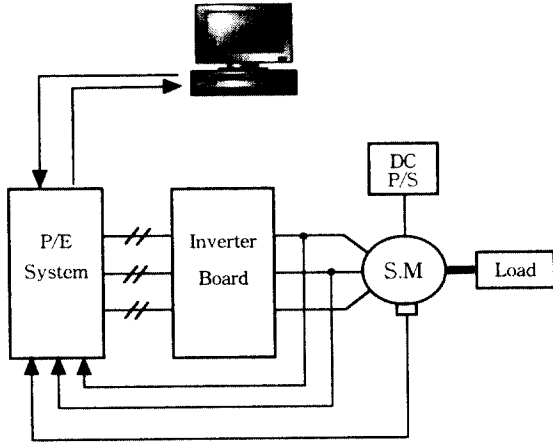


Fig. 4 The schematic diagram of hardware for S.M speed control system

그림에서 부하장치는 권선저항만을 Y결선한 3상 평형부하이다. 또한, 인버터는 삼각파비교 펄스 폭 변조방식(PWM)의 전압형 인버터(VSI)이다. 스위칭 회로부는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 베이스의 제3세대형 IPM(Intelligent Power Module)을 채용, 스위칭 주파수를 10[kHz]로 설정하였다. 또한 스위칭 회로 암간의 단락방지를 위한 데드타임은 0.1[μ s] 단위로 조정이 가능하나, 본 실험시에는 5[μ s]로 설정하여 출력 전류파형의 개선을 꾀하였다. 각도정보 검출에 이용된 센서는 절대형 로터리 엔코더를 이용하였다. 한편, 계자를 변화시키기 위한 가변전원장치로서는 DC전원공급장치(DC P/S)를 이용하였다.

전류정보의 변환에 사용된 A/D 변환기는 12bit의 분해능과 2[μ s]의 변환속도를 갖고 있다. 제어 알고리즘의 샘플링 시간은 100[μ s]로 설정하였다.

특히, P/E시스템은 모터 제어에 필요한 각종의

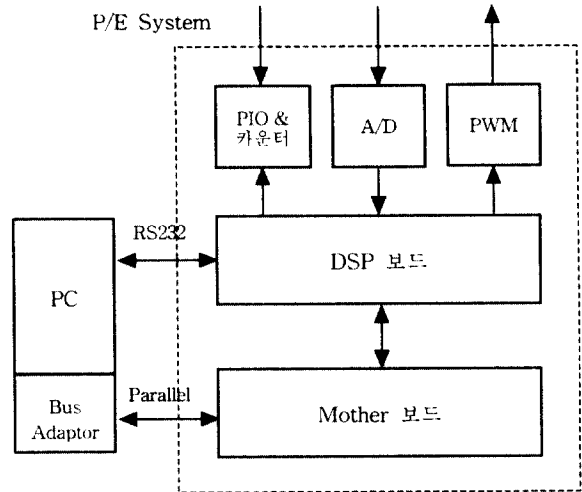


Fig. 5 Power expert system based on DSP

수학 연산 함수와 좌표변환 함수 등의 풍부한 라이브러리를 갖고 있어 제어계의 구축이 용이하다. 본 시스템은 공간 벡터 변조와 삼각파/정현파 변조방식을 선택적으로 사용할 수 있으나, 본 실험시에는 후자를 사용하였다. 특히 마더보드의 4KB 듀얼포트 메모리와 PC에 장착된 버스 어댑터 간의 패러렐 통신을 이용해서 DSP보드 상에서 연산되는 각종 제어 파라미터들을 실시간으로 관측하였다. Fig. 6에 실제 실험에 이용된 장치를 나타내었다.

3.2 제어계의 소프트웨어 구성

Fig. 7은 제어계의 소프트웨어 구성을 보이고 있다. 그림에서, 인터럽트 루틴(interrupt routine)은 제어를 위한 주 연산부로서 속도, 토크지령, 전류지령, 전압지령치를 연산하는 루틴이다. 이를 위해 센서로부터 검출된 전류, 각도정보가 입력되어

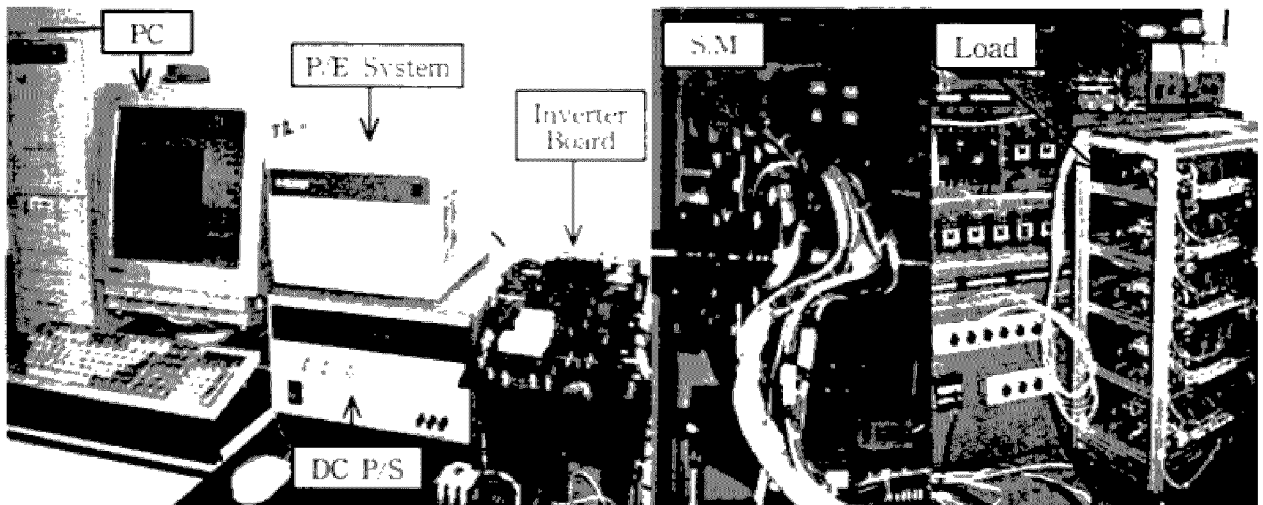


Fig. 6 The configuration of the experimental apparatus

좌표변환이 행해진다. 속도정보의 연산에는 엔코더로부터 검출된 각도정보를 이용하여 (8)식을 통해 계산된 값을 사용하였다. 또한, 프로그래밍은 범용의 "C" 언어를 이용함으로써 제어칙의 변경이나 수정에 요하는 보수시간을 줄일 수 있도록 하였다.

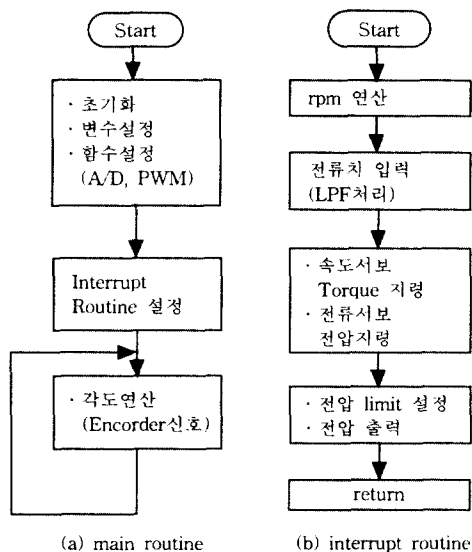


Fig. 7 Flow chart of speed control program

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \tag{8}$$

(8)식에 의한 속도정보 연산시에는 샘플링 시간이 지나치게 짧게 설정될 경우, 속도 불안정 현상이 야기되므로 적절한 소프트웨어적인 내부 루프처리를 이용하여 20ms의 주기를 설정하였다.

4. 실험 및 고찰

4.1 무부하 실험

Table 1은 무부하실험을 위해 모터의 로터측에 인가된 조건과 전류제어 알고리즘으로 실험하여 얻은 주파수 및 그때의 입력전력을 각각 나타낸다.

Table 1 Experimental conditions and results with no load

입력 조건			출력	
속도지령 [rpm]	여자전압 [V]	여자전류 [A]	주파수 [Hz]	입력전력 [W]
1000	3	1	33.3	260
1500	3	1	50	320
1800	3	1	60	380

Fig. 8은 Table 1의 조건에서 수행한 시뮬레이션의 속도응답과 출력 상전압 지령을 나타내고 있다. 이 결과로부터, 동기모터의 극수가 4이므로 출력주파수 지령 및 속도관계는 식(1)을 만족하고 있음을 보여준다. Fig. 8에서 전압은 295V가 1로, 속도는 1000rpm이 1에 각각 대응되어 있다. 이 그림으로부터 속도응답은 지령치에 정확히 추종하고 있으며, 이때의 상전압 지령 파형 또한 $2\pi/3$ 의 위상차를 갖는 깨끗한 정현파임을 알 수 있다.

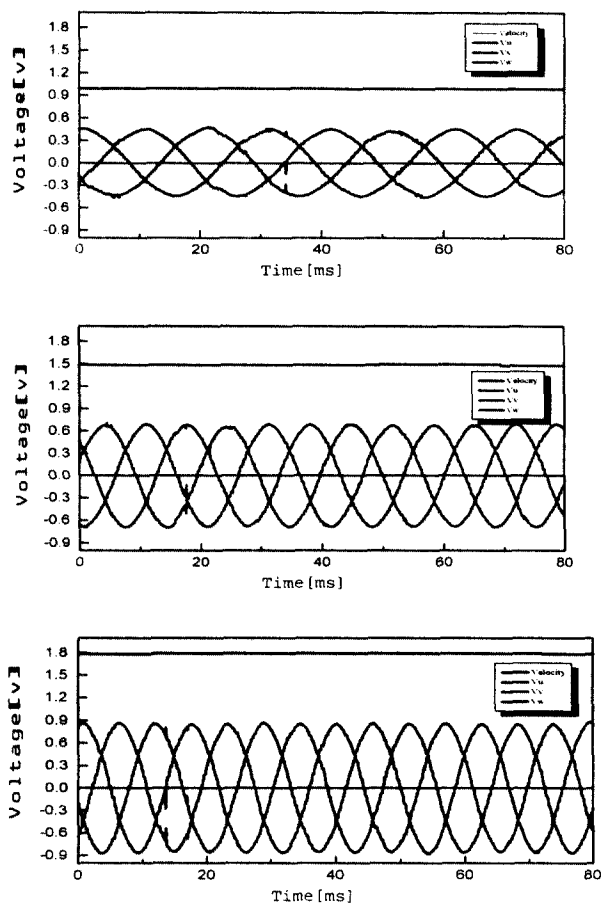


Fig. 8 Speed response and reference phase voltage wave (상 : 1000rpm)

Fig. 9는 Fig. 8의 전압지령이 모터에 인가될 때 모터로부터 얻어지는 전류응답파형을 나타내고 있다. 이 그림에서 전류는 5A가 1에 대응되고 있다. 전류파형은 인버터보드에 장착된 CT(current transformer)에 의해 검출되어 저역통과필터(low pass filter) 처리된 파형이다.

4.2 가변 부하 실험

Table 2는 동기모터의 부하 가변시의 속도지령 추종여부를 실험하기 위한 조건과 실험시에 얻은

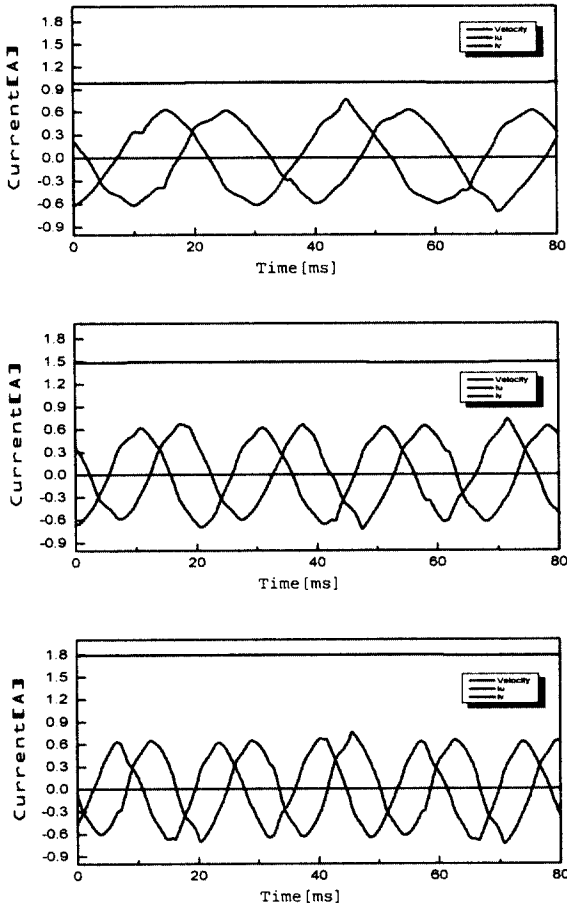


Fig. 9 Current responses (상 : 1000rpm)

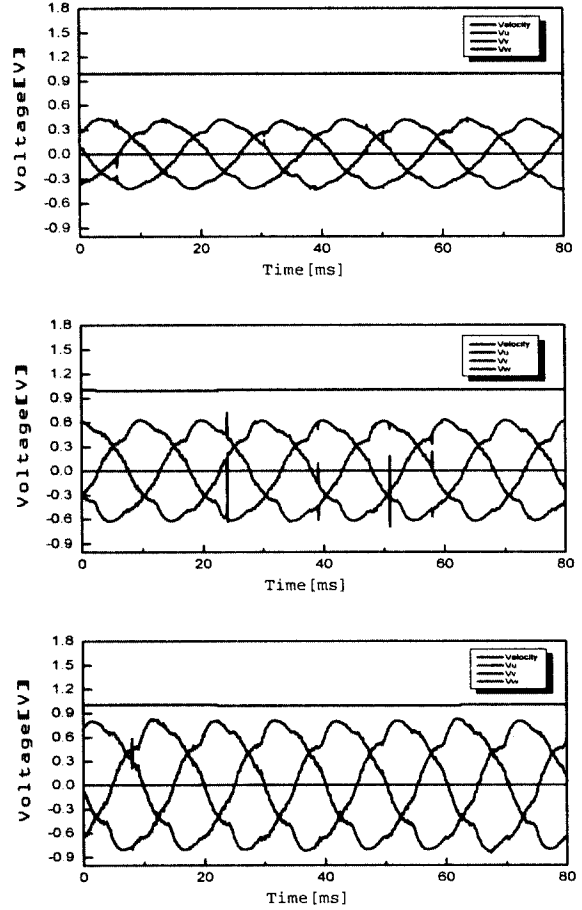


Fig. 10 Speed response and reference phase voltage (상 : 30W)

주파수 및 입력전력을 각각 나타내고 있다. 로터측에 인가된 여자전압 및 여자전류는 부하를 가변하기 위해 조정되었으며, 속도지령치는 부하의 변화에 관계없이 1000[rpm]으로 유지하였다.

Table 2 Experimental conditions and results with variable load

입력 조건			출력	
부하 [W]	여자전압 [V]	여자전류 [A]	주파수 [Hz]	입력전력 [W]
30	3	1	33.3	240
70	6	2	33.3	420
150	8	3	33.3	680

Fig. 10은 Table 2의 조건하에서의 출력 상전압 지령 및 속도응답을 각각 나타낸다. 부하실험시의 V_{dc} 및 데드타임 그리고 스위칭 주파수는 무부하 실험시와 동일하게 설정되었다. 그림에서 종축의 속도 및 전압의 크기는 무부하 실험시와 동일하다. 그림에서 전압지령 파형이 여자전류의 증가시에

왜형(distortion)화 되는 현상을 보인다. 이는 전류 파형이 자속의 간섭영향으로 왜형화되어 이의 피드백에 기인한 것으로 예상된다. 속도응답은 부하의 증감에 관계없이 지령치에 정확히 추종함을 보이고 있다.

Fig. 11에 가변부하 실험시, Fig. 10에 대응되는 전류응답파형을 보인다.

Fig. 12는 가변부하 실험(1000rpm, 150W)시의 인버터로부터 출력되는 두 상(u, v)간의 선간전압 PWM 파형의 일례를 보여준다.

5. 결 언

본 연구에서는 제어대상 모터에 대한 정확한 파라미터 추정 어려운 경우를 상정, 전류제어 알고리즘에 의한 동기모터의 속도제어 방안이 검토되었다. 이 경우는 제어의 성능이 전류정보에 의존하고 있는 관계로 PWM제어로 인한 전류의 리플 성분을 최소화하기 위해 적절한 저역통과 필터를 설계하여 이로 인한 영향을 최소화하였다. 또한, 하

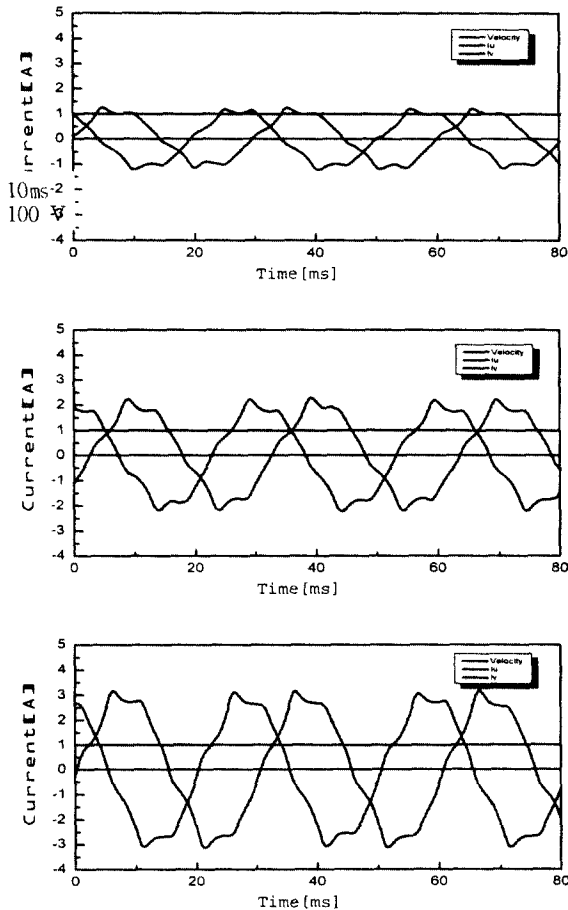


Fig. 11 Current responses (상: 30W)

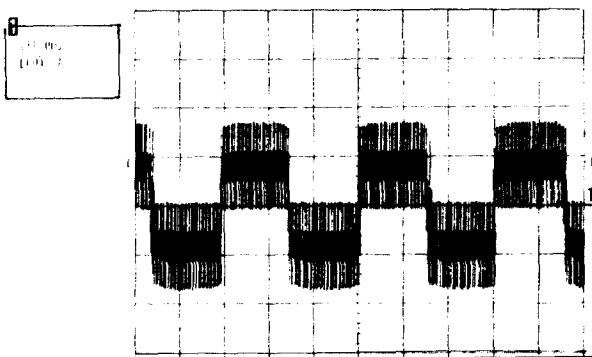


Fig. 12 Line voltage wave between u and v

드웨어 측면에서도 고속 스위칭 소자를 채용하여 데드타임의 영향으로 인한 전류과형의 왜형화가 최소화 되도록 하였다. 이상의 방법으로 비교적 양호한 속도제어 특성이 얻어졌다.

특히 본 연구에서는 디지털 소프트웨어 서보를 지향하여, 속도를 각도정보로부터 소프트웨어적으로 연산하였고, 프로그래밍도 범용의 C언어를 이용, 제어로직의 변경 및 수정에 따르는 보수시간을

대폭적으로 절감하였다. 뿐만아니라, DSP를 베이스로한 고속연산 시스템의 디버그(debug) 기능을 이용하여 제어상태의 실시간 디스플레이를 통해 제어칙의 검증을 용이하게 하고, 제어계의 구축에 소요되는 시간도 대폭적으로 줄일 수 있었다.

참고문헌

1. S. K. Jeong, Y. Fujii and T. Sekiguchi, "A Method to Realize Very Quick Torque Control of Induction Motor Systems with Voltage Source Inverter", Trans. I.E.E of Japan, Vol. 115-D, No. 4, pp. 394~401, 1995
2. I.Takahashi and T. Noguchi, "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", IEEE Trans. I.A-22, No. 5 pp. 820~827, 1986
3. 김상봉, 전봉환, 정석권, "자기동조법에 의한 유도전동기의 강인한 속도 제어계 설계", 한국정밀공학회지, 제12권, 제8호, pp. 26~34, 1995
4. NEC, " μ PD77230 Application Note (AC 서보 모터제어에로의 응용)", 1987
5. G. F. Franklin, J. D. Powell and M. L. Workman, "Digital Control of Dynamic Systems", Addison Wesley, 1991
6. 川村 昭, "ブラシレスサーボモータと選び方, 使い方", 総合電子出版社, pp. 12~20, 1986
7. 정석권, 변정환, 권혁진, "전류제어 알고리즘에 의한 동기모터의 속도제어", 한국동력기계공학회 춘계학술대회논문집, pp. 183~188, 1998