2003 정보 및 제어 학술회의 (2003.11.21-22)

dSPACE를 이용한 유도전동기 벡터제어 시스템의 실시간 시뮬레이션

박 상 은*, 이 병 하*
(Park Sang Eun and Lee Byung Ha)

* 국방과학연구소(전화:(042)821-3458, 팩스:(042)821-2224, E-mail : herjoo@hanmail.net)

Abstract : In this paper, we present a way that can implement the vector control Algorithm of induction motor and PWM signal generation on the condition Matlab/Simulink. The overall system model is designed by Simulink toolbox for vector control in induction motor. and then implement experiment with the DS1103 board of dSPACE. Although we are not coding the system, it is capable of doing simulation and experiment simultaneously. That is why Matlab and dSPACE board compiler can generate the "*.c" and "*.obj" files on the designed system automatically. After considering about hardware structure and driving system in DS1103 board. we verify the availability of proposed method through making a comparison/analysis between simulation and experiment.

Keywords : dSPACE, DS1103, Vector Control

Ⅰ. 서론

D.Naunin과 K.Hasse에 의해 교류전동기 특성개선에 관한 연구논문이 발표되었고, F.Blaschke에 의한 자속 벡터제어 논문이 발표된 이후 농형 유도전동기를 직류전동기와 동등한 제어성능을 얻을 수 있는 가능성을 보였다. 그 후, DSP 및 전력전자 소자의 발달로 유도전동기 고성능 제어기술에 대한 연구는 전 세계적으로 지난 수십년 동안 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 제어이론 및 제어기 설계기술의 발전으로 유도전동기 제어시스템이 더욱 복잡하고 다양화됨에 따라 기존 제어시스템 설계과정의 비효율성을 극복하기 위하여 제어시스템 설계, 시뮬레이션 및 실험을 위한 실행파일 생성, 구현에서 최소한의 프로그램 코딩과 반복작업으로 수행되는 실시간 제어시스템을 개발하였다. 본 논문에서는 Matlab/Simulink 환경에서 DS1103을 이용한 유도전동기 간접 벡터제어 시스템 구현과 공간전압벡터 PWM의 신호 발생을 구현의 효과적인 방법을 제시하고 있다. Simulink에서 제어시스템 블록이 구성되어 시뮬레이션에 의해 검증이 완료되면 별도의 코딩 또는 수정없이 시뮬레이션에 사용한 동일 블록으로부터 실험을 위한 C코드가 자동적으로 생성되어 유도전동기 벡터제어 시스템의 시뮬레이션과 실험을 동시에 수행할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 개발된 시스템의 유용성을 검증하기 위하여 DSP와 IPM을 이용한 유도전동기 벡터제어 시스템을 제작하고 Simulink에서 제어 시스템을 설계하고, 실험을 통하여 시스템 성능을 고찰하였다.

Ⅱ. 유도전동기 벡터제어

1. 유도전동기 수학적 모델

유도전동기는 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스가 회전자의 위치에 따라 변화하기 때문에 시변계수를 포함한 미분방정식으로 표현되므로 직류기에 비해서 제어가 매우 복잡하다. 따라서 d-q 이론을 사용하여 시변 파라미터를 제거하면 변수와 파라미터가 직교하여 d-q 모델은 고정자 위에 고정된 정지 좌표축이나 회전 좌표축이 회전하는 회전 좌표축상의 값으로 표현된다.

정지 좌표계에서 고정자의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_s^s = R_s i_s^s + \frac{d\lambda_s^s}{dt} \tag{2.1}$$

좌표축이 동기 속도 ω_e로 회전하면 다음과 같이 쓸수 있다.

$$V_s = R_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} + \omega_e \times \lambda_s \tag{2.2}$$

식(2.2)는 회전하는 d-q 좌표계에서의 d축 성분 전압과 q축 성분 전압으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + w_e \lambda_{ds} \tag{2.3}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - w_e \lambda_{qs} \tag{2.4}$$

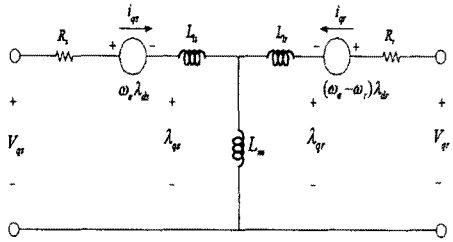
만일 회전자가 ω_r의 속도로 회전한다면 회전자에 고정된 d-q축은 전기각에 동기되어 회전하는 좌표계를

기준으로 할 때 $(\omega_e - \omega_r)$의 속도로 회전한다.

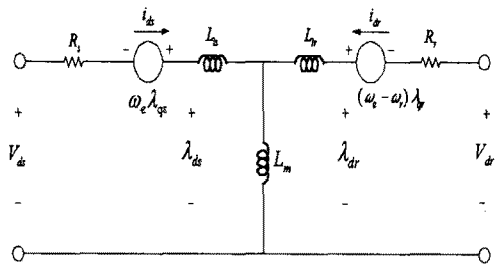
$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (w_e - w_r)\lambda_{dr} \quad (2.5)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (w_e - w_r)\lambda_{qr} \quad (2.6)$$

다음은 d-q축으로 변환한 유도전동기의 등가회로를 보여주고 있다.



(a) q 좌표축 등가회로



(b) d 좌표축 등가회로

그림 2.1 동기좌표계에서의 유도전동기 d-q 등가회로

그림 2.2에서 전류를 이용한 쇄교자속에 대한 식은 다음과 같다.

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr})$$
$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr})$$
$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr})$$
$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (2.7)$$

2. 간접벡터제어

토크의 선형성을 위하여 고정자전류를 자속과 토크 성분으로 분리시켜 직류전동기와 같이 상호간에 독립적으로 제어하는 것을 벡터제어라 한다. 이 때, 자속성분 전류는 자속각과 일치하여야 하고 동기회전 좌표계의 de축과 일치하도록 하고, 토크성분 전류는 자속각과 직교하여 동기회전 좌표계의 qe축과 일치하도록 하여 벡터제어를 수행하는데 회전자 자속의 위치를 결정하는 방법에 따라 직접 및 간접 벡터제어로 구분된다. 간접벡터제어 방식은 토크전류와 자속전류로부터 슬립각속도를 계산하여 좌표변환에 필요한 단위벡터를 발생시키는 방식이다.

$$\theta_e = \int_0^t w_e dt = \int_0^t (w_{sl} + w_r) dt \quad (2.8)$$

식(2.5), (2.6)으로부터 슬립속도 및 d축 자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_{sl} = L_m \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}^e}{\lambda_{dr}^e} \quad (2.9)$$

$$\lambda_{dr}^e = \frac{1}{1+p} \frac{R_r}{L_r} L_m i_{ds}^e \quad (2.10)$$

간접 벡터제어방식은 저속으로부터 고속영역까지 운전이 가능하고 시스템 구성이 간단한 장점이 있지만, 전동기 시정수 등 파라미터 변동에 대한 영향이 큰 단점이 있다.

III. 시스템 구현

1. SVPWM

인버터의 3상 정현파 출력전압은 PWM을 기본으로 한다. 우선 회전하는 공간벡터 영역이 감지되어야 하고 공간벡터는 d_left와 d_right를 구하기 위해서 이웃하는 공간벡터의 좌/우에 투영한다. 이는 그림 3.1과 같다.

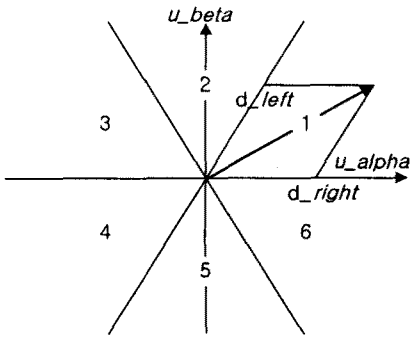


그림 3.1 공간벡터 변조

섹터 d_left, d_right의 값을 구하기 위해서 TMS320F240의 공간벡터는 PWM를 발생한다. 출력신호 PWMa~PWMc는 처음에는 low이고, 각 샘플링 주기의 끝 역시 low이며, 중앙에서 high가 된다. 신호가 high가 되는 순서는 이웃하는 공간벡터에 의해 계산된 듀티 사이클에 의해 결정된다.

듀티 사이클 Za, Zb, Zc는 최대출력전압($U_D/\sqrt{3}$)과

PWM 인버터 주기 T_{PWM}에 의한 d_left, d_right로부터의 결과들이다. 그림3.2는 섹터1에서의 전압공간벡터이다. T_{PWM}은 인터버 주기이다.

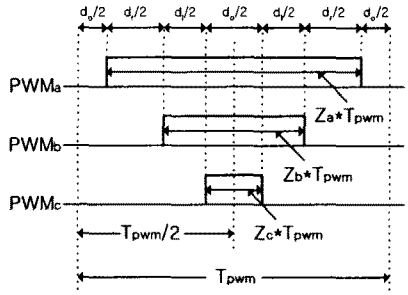


그림 3.2 PWM 인버터 듀티사이클 배열

d_l ,d_r, d_o 값은 다음과 식으로 결정된다.

$$d_l = d_{left}\frac{\sqrt{(3)}}{U_D}T_{PWM} \quad (3.1)$$

$$d_r = d_{right}\frac{\sqrt{(3)}}{U_D}T_{PWM} \quad (3.2)$$

$$d_o = T_{PWM} - d_l - d_r \quad (3.3)$$

2. DS1103을 이용한 시스템 구현

그림3.3은 본 연구에서 유도전동기 벡터제어를 수행하기 위한 전체적인 시스템 구성도를 나타낸다.

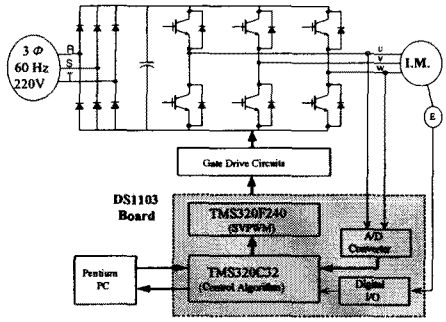


그림 3.3 DS1103보드의 전체적인 시스템 구성도

제어 실험은 그림3.3과 같으며 호스트 PC, DS1103 제어보드, PWM 인버터로 이루어지고 두 개의 전류센서는 필요한 전류정보를 가져오는데에 이용된다. 노이즈를 피하기 위하여 측정된 전압은 약 1kHz의 차단 주파수(Cutoff frequency)를 지닌 2개의 저역통과 필터(Low Pass Filters)에 의해 필터링 한다.

전동기 제어를 위해 두개의 16비트 A/D 컨버터와 한개의 DS1103 증가형 엔코더 채널이 사용되었다. DSP320F240은 인버터의 듀티 사이클을 제공하기 위해서 이용되었다.

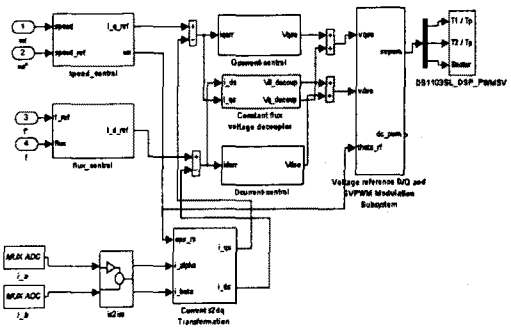


그림 3.4 DS1103의 구동 알고리즘 구성도

그림3.4는 dSPACE사에서 제공하는 DS1103보드를 이용한 전체적인 구동 알고리즘을 나타낸다. 여기에서 사용된 RTI(Real Time Interface)라이브러리는 DS1103 ENC_POS_Cx, DS1103ENC_SETUP, DS1103DAC_Cx, DS1103MUX_ADC_CONx, DS1103SLAVE_PWM INT, DS1103SL_DSP_PWMSV가 사용된 것이기도 하다. 이는 Simulink의 툴 박스와 동일하게 사용되어진다.

구성도에서 PWM 신호를 발생하는 인터페이스 구성도는 DS1103SL_DSP_PWMSV와 연결된 부분으로 SVPWM은 .c 함수로 구성되어진 S-function은 TMS320F240에서 공간 벡터 PWM에 필요한 섹터와 시간을 발생시킨다.

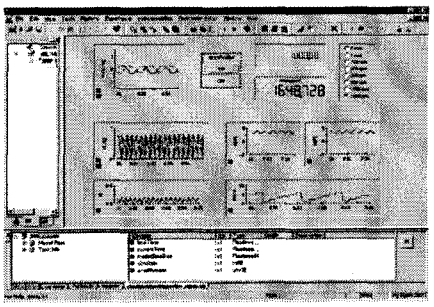


그림 3.5 Control Desk 레이아웃

그림 3.5는 Simulink에서 그래픽 모델로 프로그램되고 DS1103 제어보드 상에 RTI에 의해 수행되어지도록 실험을 수행하는데 있어 제어 및 모니터링을 하는 Control Desk 소프트웨어로 본 실험에 적용된 layout이다. 이는 실험 시 실시간으로 전류, 속도 및 PWM 시간을 모니터링하고, 시스템의 ON/OFF와 속도 제어를 할 수 있도록 구성하였다.

Ⅳ. 실험결과

실험은 Matlab/Simulink환경하에서 DS1103보드를 이용한 2.2kW 유도전동기를 사용하였다.

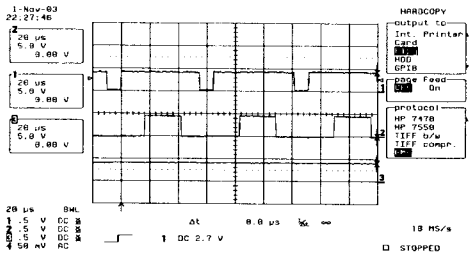


그림 4.1 인버터 게이트 신호

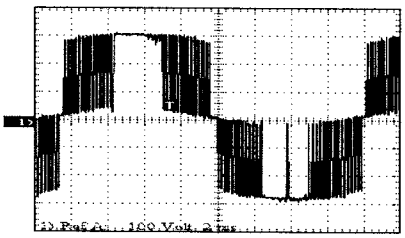


그림 4.2 인버터 선간전압

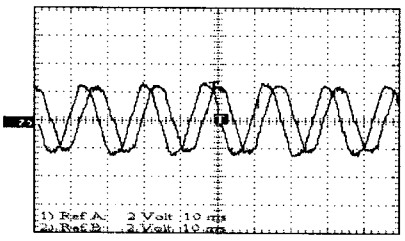


그림 4.3 인버터 두 개의 상 전류

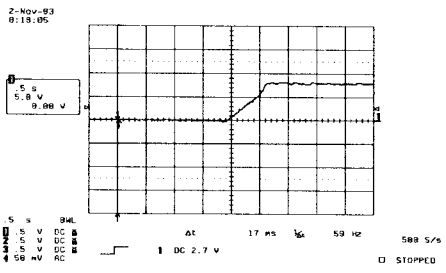


그림 4.4 무 부하시의 정격 속도 응답

그림 4.1은 인버터의 3상 게이트 신호를 각각 나타내고, 2상 대칭변조 방식을 적용하고 있음을 확인할 수 있다. 그림4.2은 그림3.3과 같은 시스템 구성도에서 유도전동기를 구동할 때 발생하는 인버터 선간전압이다. 그림4.3는 유도전동기를 구동할 때 발생하는 2개의 상전류를 각각 나타낸다. 그림 4.4의 결과는 무 부하시의 속도제어기 값 Kp=1.9693, Ki=87.5927에 해당하는 속도응답을 나타낸다. 응답속도는 대략 0.7[sec] 정도가 됨을 확인할 수 있다.

Ⅴ. 결론

본 연구에서는 Matlab/Simulink 환경 하에서 유도전동기 벡터제어 시스템을 모델링하고 dSPACE사의 DS1103보드를 이용하여 실험을 수행하였다. 특히, 시스템에 대해서 별도의 코딩없이 시뮬레이션과 실험을 동시에 수행할 수 있다는 유용성을 확인하였다.

참고문헌

[1] Zhenyu Yu "Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns", Texas Instruments application reports SPRA524 ,Mar. 1999.

[2] Martin Staebler "TMS320F240 DSP-Solution for High Resolution Position with Sin/Cos Encoders", Texas Instruments application reports SPRA496,Dec. 1998.

[3] 김배선, 설남오, 한우용, 김성중 "Matlab 한경하에서 유도 전동기 벡터 제어 구현", 전기학회 하계학술대해 논문집, pp. 1117-1119, 7. 2000.

[4]"ControlDesk: Experiment Guide", pp 31-388, 2001.

[5] Chee-Mun ONG, "Dynamic Simulation of Electri Machinery using Matlab/Simulink",Prentice Hall PTR, ISBN 0-13-723785-5, 1998.

[6] D.W.Novotny and T.A.Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Clarendon Press Oxford. ISBN 0-19-856439-2, 1997.

Appendix

이 논문에서 사용되어진 유도전동기 파라미터는 아래와 같다.

[표 1]유도전동기 파라미터

정격용량	2.2[KW]
정격속도	1730[rpm]
극수	4
정격전압 및 전류	220V/12.9A
고정자 저항	2.113[Ω]
회전자 저항	2.968[Ω]
상호 인덕턴스	146.157[mH]
고정자 인덕턴스	3.456[mH]
회전자 인덕턴스	3.456[mH]
관성 모멘트	0.0232[Kg · m^2]
마찰 계수	0.00322[[Kg · m^2/sec]