

네트워크 센서를 이용한 유도전동기 구동시스템 구현 기법

金東植[†], 全泰園[‡], 安正烈^{***}, 金興根^{****}, 魯義哲^{****}

Implementation Method for an Induction Motor Drive System Using Network Sensors

Dong-Sik Kim, Tae-Won Chun, Jung-Ryol Ahn, Heung-Gun Kim, and Eui-Cheol Nho

요 약

본 논문은 교류전류 센서, 전압센서 및 엔코더를 포함한 PWM인버터-유도전동기 구동장치 전체를 네트워크로 제어하는 시스템을 구현한다. 네트워크 기반 유도전동기제어는 공장자동화에 중요한 이슈로 되고 있으나, 센서와 제어기 사이에 센서데이터의 통신지연에 의해 전동기 구동시스템의 안정성을 저하시키는 문제가 있다. 따라서 동기신호 및 센서데이터의 예측기법을 사용하여 네트워크에 의한 센서데이터의 시간지연을 최소화시키는 기법을 제시한다. DSP를 사용한 실험을 통하여 제시한 기법의 타당성을 확인한다.

ABSTRACT

In this paper, the system to control the PWM inverter-induction motor drive system including ac current sensors, voltage sensors, and an encoder through the network is developed. Although the network-based control for an induction motor drive system is becoming increasingly important at factory automations, there will inevitably be time delay from the sensors to the motor control system, which may cause the instability. The algorithm to minimize the effects for network induced time delay of sensor data is proposed, using both the synchronous signal and the method for estimating sensor data. The experiments with DSP are carried out in order to verify proposed algorithms.

Key Words : CAN, time delay, data estimation, synchronous signal, induction motor

1. 서 론

최근에 자동화 시스템에서는 자동화 공정의 설계, 구축 및 유지관리에 유연성과 신뢰도를 극대화시키는 것이 가장 중요하다. 그리하여 모든 공정의 통합화를

추구하는 분산제어 및 자동화시스템에서 네트워킹기술은 가장 핵심이 되는 기술로 부각되고 있다^[1,2].

공장 자동화 설비의 자동화설 중 대표적인 액츄에이터인 PWM인버터-전동기 구동시스템의 네트워크 제어의 중요성이 점차 증가되고 있다. 따라서 다수의 전동기를 상위컴퓨터에서 네트워크를 통하여 각 전동기의 위치 또는 속도제어 및 동작상태를 감시하는 논문이 발표되었다^[3,4]. 그리고 전동기제어 모듈, 엔코더 모듈 및 모니터링 모듈 등을 포함한 스마트 모듈 개발에 관한 연구가 발표되었다^[5]. 그런데 네트워크로 전동기를 제어하

[†]교신저자 : 정희원, 울산대 전기전자정보공학부 박사과정

E-mail : dngsikm@korea.com

[‡]정희원, 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수

^{***}정희원, 울산대 전기전자정보시스템공학부 박사과정

^{****}정희원, 경북대 전자전기공학부 교수

^{****}정희원, 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수

접수일자 : 2006. 10. 2 1차 심사 : 2006. 10. 19

심사완료 : 2005. 11. 13

로 센서와 제어기 사이에 네트워크의 특성상 각 메시지의 우선순위로 인하여 시간지연이 반드시 발생된다. 이 시간지연에 의해 제어시스템의 성능 저하뿐만 아니라 안정성문제까지 발생할 수 있다. 특히 엔코더에 의한 속도 및 위치값과 함께 3상 전류 및 전압값을 네트워크를 통하여 전송받아 유도전동기 벡터제어를 수행 시, 교류 전류 및 전압 값 때문에 네트워크 시간지연의 영향을 더 많이 받는다. 이에 관련된 연구 대부분이 네트워크에 의한 시간지연이 불규칙적으로 발생되거나 또는 시간에 따라 변화될 경우 시스템의 안정성 해석, 제어기 설계 등에 대한 것이다^[6,7].

본 논문에서는 벡터제어 유도전동기 구동시스템을 4개의 모듈 즉 전류센서 모듈, 전압센서 모듈, 엔코더 모듈과 전동기 제어모듈로 구성한다. 그리고 3상 교류전류, 3상 교류전압 및 직류링크 전압, 속도 및 위치정보 등을 3개 센서모듈로부터 네트워크로 전송받아 벡터제어를 수행 시, 각 센서데이터의 네트워크 시간지연에 대한 영향을 최소화시키는 기법을 제시한다. 이 기법의 타당성을 DSP를 사용한 실험을 통하여 확인한다.

2. 네트워크 구성

그림 1은 벡터제어 유도전동기 구동시스템의 네트워크 구성도이다. 이 네트워크는 전압센서 모듈, 전류센서 모듈, 엔코더 모듈 및 전동기 제어 모듈 등으로 구성된다. 3개의 센서 모듈에서 각각 3상 교류전류, 3상 교류전압 및 직류링크전압, 속도 및 위치 정보를 측정 계산한 후, 네트워크를 통하여 전동기 제어 모듈로 전송한다. 이 전동기 제어 모듈에서는 3개의 센서모듈로부터 전송받은 값으로 유도전동기의 벡터제어를 수행하여 6개 PWM 신호를 PWM인버터로 출력시킨다. 이 제어용 네트워크로 여러 가지 펄드버스 중 내 노이즈성이 우수하면서 비교적 저렴하여 많은 프로세서에서 내장된 네트워크인 CAN(Controller Area Network)을 사용하였다^[8].

3개 센서 모듈에서는 CAN제어기를 자체 내장하고 있는 TI사 16비트 DSP인 TMS320LF2406를 사용하였다. 전류센서 모듈에서는 3개의 전류형 Hall-CT로 3상 교류전류를 측정 후, 저역필터 및 증폭기를 거쳐 DSP에 내장된 10비트 A/D컨버터에 입력된다. DSP에 내장된 CAN제어기와 외부 트랜시버를 거쳐 전류값을

네트워크를 통하여 전송한다. 전압센서 모듈에서는 차동증폭기로 3상 교류전압 및 직류링크 전압을 각각 측정 후, 전류 센서모듈과 같은 과정을 거쳐 3상 교류전압과 직류전압값을 전송한다. 엔코더 모듈에서는 3개의 엔코더의 출력신호 A, B, Z신호를 포토 커플러를 거치고 DSP내의 카운터로 엔코더 출력펄스를 카운팅하여 속도 및 위치정보를 계산하고 네트워크로 이 값을 전송한다.

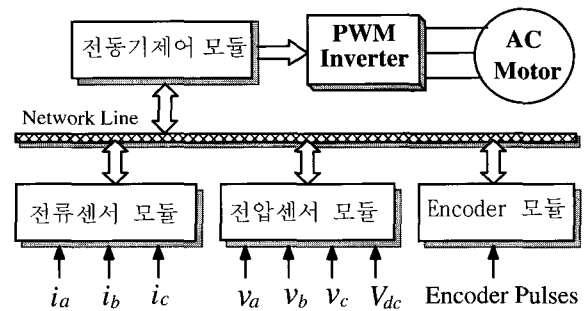


그림 1 네트워크 구성도

Fig. 1 Network configuration

전동기 제어 모듈에서는 네트워크로 전송받은 센서값으로 벡터제어를 수행한다. 이 모듈에서는 클럭주파수가 150MHz인 고성능 32비트 DSP TMS320F2812를 사용한다. 이 DSP에서 벡터제어 루우프를 수행한 후 6개의 PWM신호에 dead time까지 포함하여 인버터로 출력시키며, 과전류가 발생 시 이 PWM신호를 차단한다. 또한 4-채널 12-비트 D/A컨버터로 DSP내 주요변수의 파형을 오실로스코프로 관찰한다.

이 CAN의 전송속도는 1Mbps이며, 트랜시버는 동일 회사 제품인 SN65HVD23을 사용하였다.

3. 센서 데이터 통신방법

3.1 센서데이터 전송방법

이 시스템에서 사용한 CAN은 최대 1Mbps 전송속도를 지원하므로 1비트 전송 시 $1\mu s$ 의 시간이 소요되며, 전송하는 데이터 비트수만큼 시간지연이 발생하게 된다. 또한 각 센서 모듈이 독립적으로 동작하므로 통신 지연시간을 정확히 알 수 없으며, 이 불확실한 시간지연은 시스템의 성능저하뿐만 아니라 안정성에 큰 문제를 발생시킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 3개 센서모듈의 통신지연 시간을 일정하게 유지하기 위하여, 3개 모듈

에서 전동기 제어 모듈로 전송하는 시점을 동기화 시키는 방법을 제시하였다. 그림 2는 센서 데이터를 전송하는 방법으로, 제어모듈에서 각 센서모듈로 전송하는 동기신호와 각 센서모듈에서 센서데이터를 전송하는 시점을 보인 것이다.

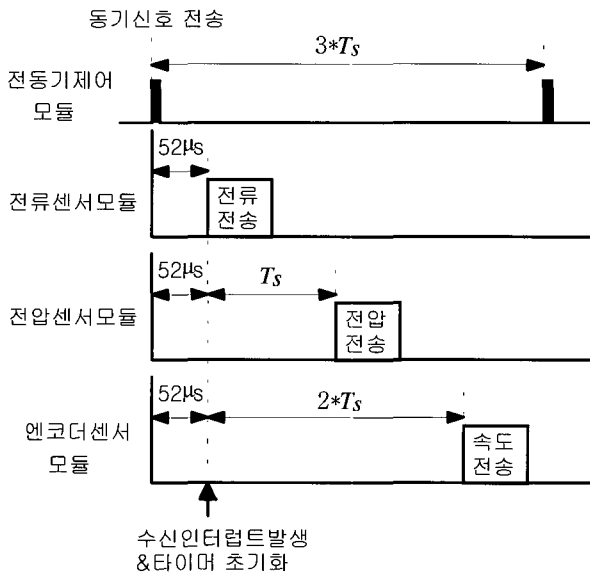


그림 2 각 센서값 전송 방법
Fig. 2 Method of data transmission at sensor modules

유도전동기 벡터제어루프를 수행하는 샘플링시간 T_s 는 $150\mu\text{sec}$ 이며, 이 샘플링시간의 3배인 $450\mu\text{sec}$ 마다 제어모듈에서 3개 센서모듈로 동기신호를 동시에 보낸다. 동기신호의 메시지는 ID가 11비트이며 데이터가 8비트이므로 전체 52비트로 구성된다. CAN의 전송속도가 1Mbps이므로 $52\mu\text{sec}$ 시간 후에 3개의 센서모듈에서 전송받은 동기신호에 의해 CAN 수신인터럽트가 발생되고, 각 DSP에 내장된 타이머를 동시에 0으로 초기화시킨다. 이 타이머 값으로 각 센서모듈에서 제어모듈로 센서데이터를 전송할 시점을 측정한다. 각 센서모듈에서는 약 $52\mu\text{s}$ 시간지연 후, 이 타이머를 사용하여 샘플링시간 $150\mu\text{s}$ 간격으로 3개의 센서 모듈에서 각 센서 값을 전동기제어 모듈에 전송한다.

그림 3은 동기신호에 대한 3개 센서모듈의 타이머파형을 보인 것이다. 동기신호를 받으면 전류센서 모듈에서는 바로 측정된 전류값을 전송한다. 전압센서 모듈에서 동기신호를 받은 후 한 샘플링시간 $150\mu\text{s}$ 후에 전압 값을, 엔코더 모듈

에서는 두 샘플링시간 $300\mu\text{s}$ 에서 속도 및 위치 정보를 제어모듈로 각각 전송한다.

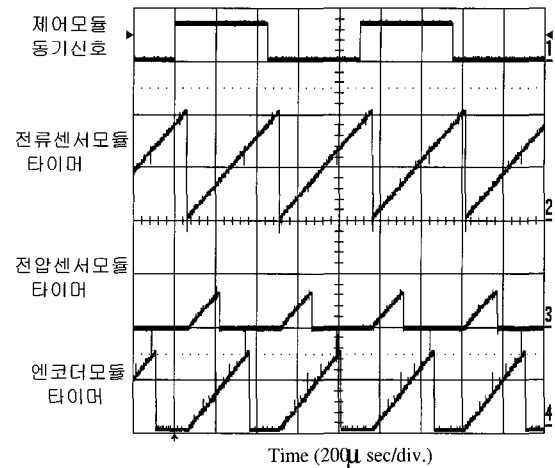


그림 3 동기신호에 따른 센서 모듈의 타이머 파형
Fig. 3 Timers of sensor modules with synchronous signal

3.2 전동기제어 모듈에서 데이터 통신방법

제어 모듈에서는 CAN으로 각 센서모듈에서 전송받은 데이터로 벡터제어를 수행한 후, PWM 인버터로 PWM신호를 출력시키고, PWM 인버터로 유도전동기를 구동한다.

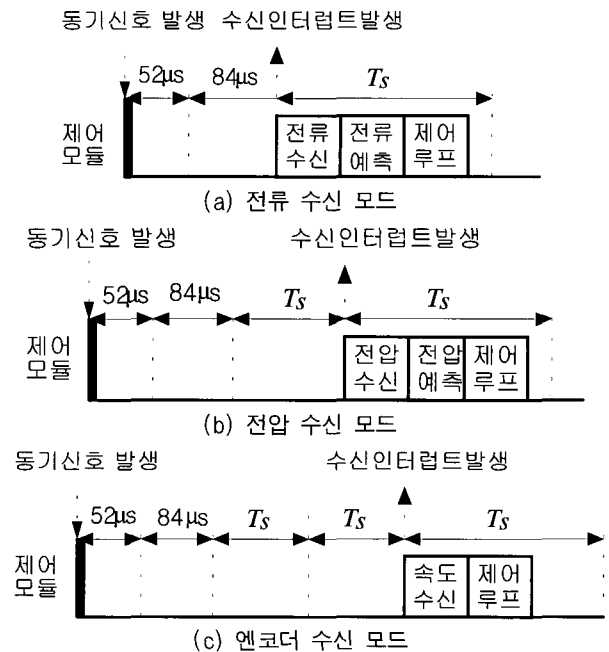


그림 4 제어모듈의 데이터 통신 방법
Fig. 4 Method of data communication for control module
그림 4는 제어모듈에서 각 센서모듈로부터 센

서데이터를 수신하여 동작하는 타이밍을 보인 것으로, 전류 수신모드, 전압 수신모드, 엔코더 수신모드 등 3개의 동작모드로 구성된다. 여기서 3개의 샘플링시간 중 각 샘플링시간마다 1개의 센서모듈로부터 측정된 센서값을 수신할 수 있으므로 센서값을 전송받지 못하는 나머지 샘플링구간에서 사용할 센서값을 예측하여야 한다.

그림 4(a)는 전류수신 모드로 전류센서 모듈에서 CAN을 통하여 전류값을 전송한다. 전송시간 $84\mu s$ 후에 전동기 제어모듈에서 CAN 수신인터럽트가 발생되고 전류값을 수신하게 된다. 이 때 현재 수신한 3상 전류와 그 전에 전송받은 전류값을 이용하여, 다음 두 샘플링구간에서 사용할 전류값을 예측하게 된다. 그리고 전 샘플링구간에서 예측한 전압과 현재 수신한 전류 및 속도정보를 이용하여 벡터제어루프를 수행하게 된다.

그림 4(b)는 전압수신 모드로 제어모듈이 전압센서모듈로부터 3상 교류전압 및 직류링크 전압을 수신 받는다. 전류 수신모드에서 발생한 수신인터럽트 발생 시점에서 약 한 샘플링시간 후에 CAN 수신인터럽트가 발생하고 전압값을 전송받는다. 이 모드에서는 수신한 전압값 등을 이용하여 다음 두 샘플링구간에서 사용할 전압값을 예측하게 하고 벡터제어루프를 수행한다.

그림 4(c)는 엔코더수신 모드로 엔코더모듈로부터 속도 및 위치값을 수신받고, 전 단계 샘플링구간에서 예측한 전류 및 전압값을 사용하여 벡터제어를 수행한다. 여기서 전동기의 기계적 관성이 상당히 크기 때문에 3개 샘플링 시간 중 전동기 속도는 거의 변화가 없으므로, 다음 두 샘플링구간을 위하여 속도값을 예측할 필요가 없다.

4. 센서데이터 예측기법

앞에서 언급한 바와 같이 샘플링시간 $150\mu s$ 의 3배인 $450\mu s$ 구간에서 각 샘플링시간마다 1개 센서모듈에서만 센서데이터를 전송받을 수 있다. 따라서 매 샘플링구간마다 전송받은 전류 또는 전압 값과 예측한 전류 또는 전압 값을 같이 사용하여야 한다.

그림 5는 여러 센서데이터 중 a상 전류를 예측하는 방법을 보인 것이다. 이 그림에서 I_{a_en} , I_{a_eo} 는 각각 현재 샘플링구간에서 전송받은 전

류, 3개 샘플링시간 전에 전송받은 전류이다. 전류센서 모듈에서 제어모듈까지 약 $84\mu s$ 의 시간 지연이 발생된다. 이 두 전류의 기울기로 다음 두 샘플링구간에서 사용할 전류값을 예측한다.

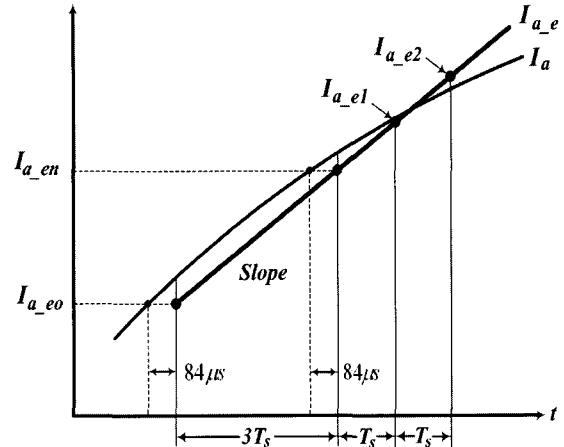


그림 5 센서데이터 예측방법
Fig. 5 Method for estimating sensor data

a상 교류전류 값은 $3T_s$ 마다 측정하므로, 이 두 전류의 기울기는 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$Slope = \frac{I_{a_en} - I_{a_eo}}{3T_s} \tag{1}$$

이 기울기를 사용하여 첫 번째 샘플링구간과 두 번째 샘플링구간에서의 예측전류 값은 다음 식과 같이 각각 계산할 수 있다.

$$I_{a_e1} = I_{a_en} + T_s \times Slope \tag{2}$$

$$I_{a_e2} = I_{a_en} + 2T_s \times Slope \tag{3}$$

5. 실험 결과

실험을 수행하기 위하여 IGBT를 사용한 PWM인버터에 3.3KW용량의 유도전동기를 사용하였으며, 유도전동기 부하로 플라이휠을 사용하였다. 그림 6은 실험장치의 사진이다. 아래 부분이 유도전동기와 전동기축에 연결된 플라이휠이며, 위쪽에 3개 센서 모듈과 전동기 제어모듈을 볼 수 있다.

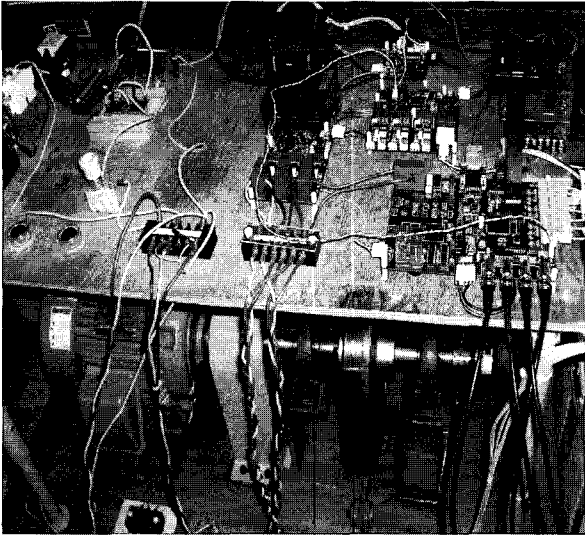
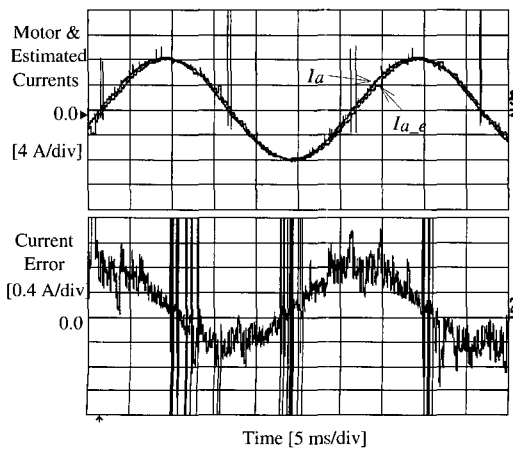


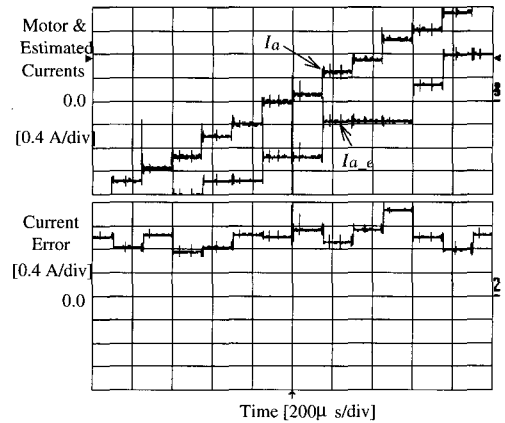
그림 6 실험장치 사진
Fig. 6 Photograph for the experiment apparatus

그림 7은 각 센서모듈에서 센서값을 랜덤하게 네트워크로 전송 시 실제 전동기 전류와 예측전류의 파형을 보인 것이다. 실제 전동기전류에 대한 예측전류의 오차가 최대 18%가 되어, 예측전류에 상당한 오차가 있다. 그림 7(b)에서 보면 네트워크의 트래픽때문에 센서값을 전송받는 시간간격이 상당히 변화하며, 가끔씩 샘플링시간의 3주기 동안 단 한번만 센서값을 전송받을 수 있다.

그림 8은 동기신호와 예측 알고리즘을 적용할 경우, 실제 전동기 전류와 예측전류의 파형을 보인 것이다. 실제 전동기전류에 대하여 예측전류의 최대 오차가 약 7%로 크게 감소되었으며, 따라서 이 예측전류와 전압으로 벡터제어에 사용하는데 거의 문제가 없다.

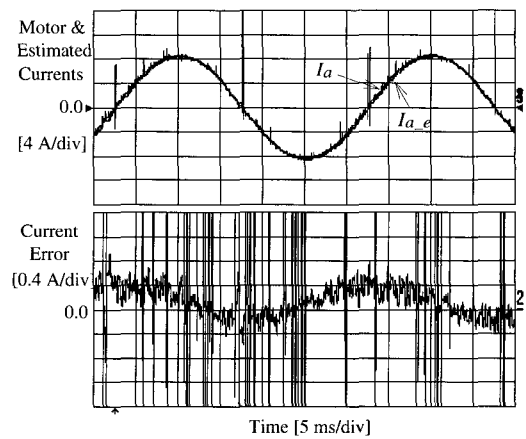


(a) 전동기전류 및 예측전류

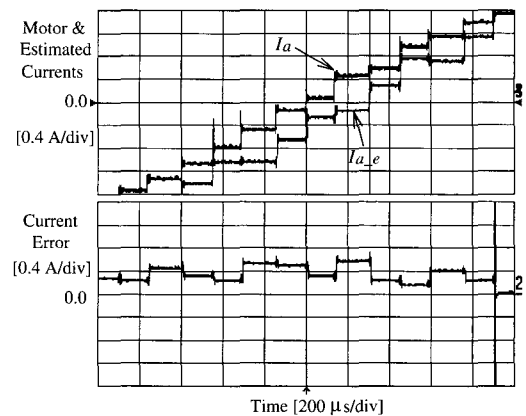


(b) 전동기전류 및 예측전류 (확대 파형)

그림 7 센서데이터를 랜덤하게 전송시 실험결과
Fig. 7 Experimental results when the sensor data randomly transmit



(a) 전동기전류 및 예측전류



(b) 전동기전류 및 예측전류 (확대 파형)

그림 8 예측기법 적용 시 실험결과
Fig. 8 Experimental results when the estimation method is applied

그림 9는 제어모듈과 3개의 센서모듈에서 CAN제어기의 TX신호파형을 보인 것이다. 제어모듈에서 동기신호를 전송하고 약 84μsec 시간지연 후 3개의 센서모듈에서 샘플링시간인 150μsec 마다 각 센서 값을 전송한다. 이때 각 센서모듈의 CAN 메시지 데이터의 크기에 따라 TX신호의 길이가 달라진다.

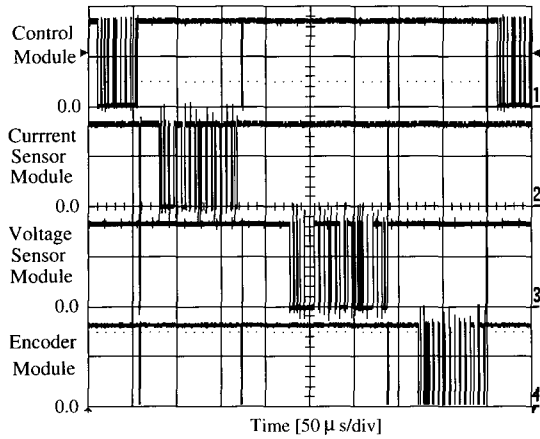


그림 9 각 모듈별 TX신호
Fig. 9 TX signals for four modules

그림 10은 이 센서모듈을 이용한 유도전동기 벡터제어 시 전동기 기준속도를 0에서 500rpm 다시 500rpm에서 1000rpm으로 증가시킬 때, 전동기 속도 및 d축과 q축 전류의 과도응답특성을 보인 것이다. 전동기 속도는 기준속도에 잘 추적하였으며, 플라이휠 부하를 사용하였으므로 정상상태에서도 q축 전류가 상당히 작음을 알 수 있다.

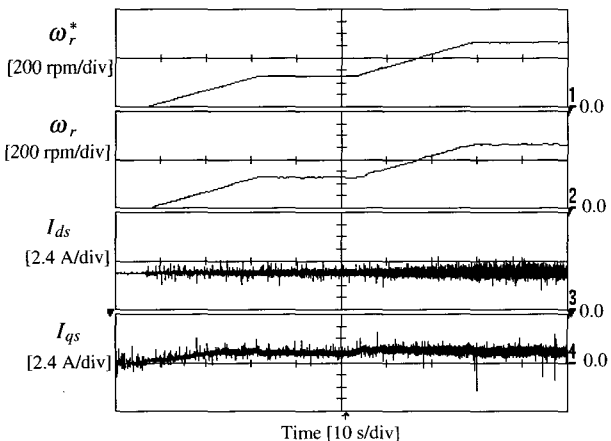


그림 10 기준속도 변화 시 과도응답 특성
Fig. 10 Transient response when the reference speed is changed

6. 결 론

본 논문은 벡터제어 유도전동기 구동시스템에서 제어시스템을 포함한 전류, 전압 및 속도센서를 모두 CAN으로 제어하는 방법을 사용하였다. 동기신호와 각 센서모듈의 타이머를 사용하여 각 센서데이터의 전송지연시간을 일정하게 유지하였으며, 센서데이터의 예측기법을 도입하여 네트워크 지연시간의 영향을 최소화하였다. 3개의 센서모듈과 전동기제어 모듈로 유도전동기제어를 위한 네트워크를 구축하였다. 전동기 전류에 대한 예측한 전류의 오차가 최대 7% 이내로 유지하였으므로, 예측한 전류 및 전압으로 벡터제어 수행에 문제가 거의 없다. 각 센서모듈로부터 전송받은 센서값으로 유도전동기 벡터제어 시, 유도전동기 속도 과도응답 특성 역시 우수함을 입증하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-067) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] 박홍성, 권옥현, "산업용 네트워크와 그 응용", ICASE Magazine, 제2권, 4호, July, 1996, pp. 4-18.
- [2] I.A. Janet, W.J. Wiseman, R.D. Michelli, A.L. Walker, and S.M. Scoggins, "Using Control Networks for Distributed Robotic Systems", in Conf. Rec. on Robotics, Vol. 2, 1999, pp. 1138-1143.
- [3] H.H.Lee, E.H.Jung, and K.S.Lim, "Robust Induction Motor Control on Network-Based Control Systems", in Annual Conference of IEEE-Industrial Electronics Society, 2003, pp.72-76.
- [4] Jan Bosteels, "Coordinated Multi-Axis Motion Control Via CANopen", CAN Newsletter, Feb., 2002.
- [5] K.C.Lee, H.H.Kim, S.Lee, and H.H.Lee, "IEEE- 1451 -Based Smart Module for In-Vehicle Networking Systems for Intelligent Vehicles", IEEE Trans. On Ind. Electron., vol.51, no.6, 2004, pp.1150-1157.
- [6] J.K.Yook, D.M.Tilbury, and N.R.Soparkar, "A Design Methodology for Distributed Control Systems to Optimize Performance in the Presence of Time Delay", Int. J. Contr., vol.74, no.1, 2001, pp.58-76.
- [7] J.Nilsson, B.Bernhardsson, and B.Wittenmark, "Stochastic Analysis and Control of Real-Time

Systems with Random Time Delay", Automatica, vol.34, no.1, 1998, pp.57-64.

- [8] G.Cena, and A.Valenzano, "An Improved CAN Fieldbus for Industrial Applications", IEEE Trans. on Ind. Electron., vol.44, no.4, 1997, pp.553-564.

저 자 소 개



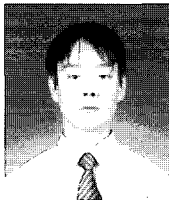
김동식(金東植)

1970년 2월 18일생. 1995년 광주대 전자공학과 졸업. 1997년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 울산대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



전태원(全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박), 1997~1997 Tennessee 대학방문교수, 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수.



안정렬(安正烈)

1976년 11월 8일생. 2002년 원광대 전기전자공학부 졸업 2004년 울산대 대학원 전기전자 정보시스템공학부 졸업(석사). 2004년~현재 동 대학원 박사과정.



김흥근(金興根)

1956년4월 24일생, 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박), 현재 경북대 전자전기공학부 교수.



노의철(盧義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공박). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin -Madison 방문교수. 1995년~현재 부경대학교 공대 전기제어계측공학부 부교수.