

ARM Cortex-M4 마이크로컨트롤러를 사용한 유도전동기의 저가형 벡터제어 인버터 설계

김동기¹, 윤덕용^{1*}

¹공주대학교 대학원 전기전자제어공학과

The Design of Low-Cost Vector-Controlled Inverter for Induction Motor Using ARM Cortex-M4 Microcontroller

Dong-Ki Kim¹ and Duck-Yong Yoon^{1*}

¹Department of Electrical, Electronic and Control Engineering,
Graduate School of Kongju National University

요약 본 논문은 ARM Cortex-M4 마이크로컨트롤러를 사용하여 3상 유도전동기용의 저가형 벡터제어 인버터를 설계하는 방법을 제안한다. 이 MCU는 냉장고, 에어컨, 세탁기와 같은 가전제품을 제어하기 위하여 기존의 값비싼 DSP 소자를 대신할 수 있다. 본 논문에서는 전동기 제어에 필요한 Cortex-M4의 주요 기능들을 정리하고, 이를 사용하여 벡터제어 인버터를 설계하는 방법을 기술한다. 실험용 벡터제어 인버터를 설계 제작하여 200[W]의 3상 유도전동기에 적용하였고, 이를 사용한 실험 결과는 기존의 TMS320F28335 DSP와 유사한 수준의 제어 성능을 보였다.

Abstract This paper proposes the design method of low-cost vector control system for induction motor using the ARM Cortex-M4 microcontroller. This MCU can be used instead of expensive DSP to control the home appliances such as refrigerator, air conditioner, washing machine and so on. This paper explains the major features of Cortex-M4 for motor control and how to realize a vector-controlled inverter using it. The developed system is applied to 3-phase induction motor of 200[W] and experimental results show good performance similar to the system using TMS320F28335 DSP.

Key Words : ARM, Cortex-M4, induction motor control, vector-controlled inverter, low-cost inverter

1. 서론

반도체 및 제어기술의 발전으로 벡터제어 인버터가 쉽게 구현됨으로써 이제 유도전동기는 산업용 가변속 제어 시스템에 널리 사용되고 있다. 그러나, 산업용 제어기와 달리 냉장고, 에어컨, 세탁기 등과 같은 가전제품에서는 수백와트 정도 이하의 소용량 전동기를 사용하고 있어서 전동기 자체에 비하여 컨트롤러의 가격이 높고, 또한 전동기 제어 시스템의 가격이 전체 제품의 가격에서 차지하는 비중이 상당히 높으므로 이를 저렴한 가격으로 구현하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이 때문에 현재 산업

용에서 보편적으로 사용하고 있는 벡터제어 인버터 기술을 가전제품에서는 최근까지도 거의 사용하지 못하고 있는 실정이며, 2000년대 들어서야 이를 가전제품에 적용할 수 있도록 저가격화하려는 노력이 적극적으로 이루어지기 시작하였다. 가전제품에 사용할 수 있는 정도의 소용량 벡터제어 인버터를 저가격화하기 위한 노력은 크게 다음과 같이 4가지의 분야로 나누어 설명할 수 있다.

첫째는 전력회로 부분으로서, 반도체 기술의 발전으로 3상 인버터를 구성하는 6개의 반도체 스위칭 소자와 이를 위한 구동회로 및 각종 보호회로 등을 하나의 소자로 모듈화한 IPM(Intelligent Power Module) 또는 SPM

본 논문은 중소기업청 산학공동기술개발사업의 과제와 관련하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Duck-Yong Yoon (Kongju National University)

Tel: +82-41-521-9165 email: yoony3m@kongju.ac.kr

Received November 5, 2012 Revised January 2, 2013 Accepted February 6, 2013

(Smart Power Module)이 상품화되고 있으므로 이를 전력 회로에 사용하는 것이다[1]. 둘째는 제어 알고리즘을 실행하는 마이크로컨트롤러로서, 이것의 성능이 빠르게 향상되고 전동기 벡터제어에 필요한 PWM 제어 모듈이나 A/D 컨버터 등의 주변장치를 내장한 전동기 제어용의 DSP(Digital Signal Processor) 소자가 꾸준히 개발되고 있으므로 이를 사용하여 인버터를 설계하는 것이다[1]. 셋째는 전동기의 입력전류를 측정하기 위한 전류센서 부분으로서, 그동안 널리 사용되어온 홀전류센서는 가격이 높아서 소용량 시스템의 경우 이것이 제품의 원가에서 차지하는 비중이 높으므로 셉트저항을 사용하여 저가적으로 전류를 측정하는 것이다[2]. 넷째는 전동기의 회전 속도를 측정하는 부분으로서, 현재까지 전동기의 외부에 장착하여 사용해온 로터리 엔코더나 타코 제너레이터는 가격이 비싸고 사용 환경의 제약이 있으므로 이를 전동기에 간단하게 내장하거나 속도측정 장치 없이 소프트웨어적으로 회전속도를 추정하여 사용하는 센서리스 제어 기술이 연구되어 왔다[3].

본 논문에서는 이러한 벡터제어 인버터의 저가격화 기술과 관련하여 주로 마이크로컨트롤러 문제에 초점을 맞추어 연구하고자 한다. 유도전동기의 벡터제어를 위해서는 속도 및 전류제어기에서 PI 제어 알고리즘을 수행하고 전압과 전류의 좌표변환 등을 실시간으로 처리해야 하는데, 여기에는 삼각함수 등 많은 부동소수점 연산을 필요로 하므로 고속 실수연산 처리가 가능한 마이크로컨트롤러가 사용되어야 한다.

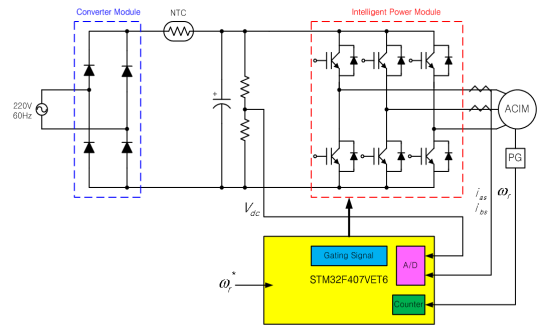
전통적으로 전동기 벡터제어 인버터에서는 부동소수점 데이터의 고성능 실시간 연산이 가능한 TI(Texas Instruments)사의 TMS320F28x 계열 DSP를 널리 사용하여 왔다. 그러나, 실시간 운영체제를 바탕으로 하는 모바일 제품의 시장에서 압도적인 우위를 보여온 ARM사에서 2010년에 DSP 명령어 및 FPU(Floating Point Unit) 기능을 내장한 32비트 고성능 마이크로컨트롤러 Cortex-M4 코어를 발표하고, 이후 STMicroelectronics사를 비롯한 여러 반도체 회사에서 이 Cortex-M4 코어가 탑재된 마이크로컨트롤러 제품을 출시하면서 DSP 시장에 큰 변화를 일으키고 있다. 이들 ARM 마이크로컨트롤러는 ARM사에서 제공하는 검증된 DSP 코어를 내장하고 있어서 가격이 훨씬 저렴하며, 여기에 많은 반도체 회사에서 경쟁적으로 마이크로컨트롤러로서의 다양한 I/O 기능을 추가하여 상품화하고 있으므로 기능이 우수하고 수급 불안정의 문제가 발생할 우려가 적다.

본 논문에서는 ARM Cortex-M4 코어를 장착한 32비트 마이크로컨트롤러를 사용하여 어떻게 벡터제어 인버터를 구현할 수 있는지 기술하고, 이것이 기존의 부동소

수점 연산형 DSP처럼 벡터제어 인버터를 구현하는데 충분한 성능을 가지고 있는지 실험적으로 확인한다.

2. 벡터제어 인버터의 저가격화 방안

가정용 단상 전원을 사용하는 3상 유도전동기를 위한 벡터제어 인버터의 기본 구성은 Fig. 1과 같다. 단상 교류전원은 다이오드 정류기를 사용한 컨버터에 의해 직류전원으로 변환되고, 이는 다시 3상 인버터에 의하여 전동기를 구동하는 3상 교류전원으로 변환된다. 이러한 벡터제어 인버터를 가전제품에 사용할 수 있도록 수만 원대의 저가격으로 구현하기 위한 방안을 4가지의 주요 부분으로 나누어 살펴보면 다음과 같다.



[Fig. 1] Vector-controlled inverter of induction motor

2.1 컨버터 및 인버터의 전력회로

벡터제어 인버터의 전력회로는 단상 컨버터와 3상 인버터로 나누어지는데, 컨버터는 다이오드 모듈을 이용하여 간단히 구성되며, 여기에 돌입전류 방지용 써미스터와 커패시터를 사용한 평활회로가 추가된다.

3상 인버터를 구성하기 위해서는 최소 6개의 반도체 스위칭 소자와 이를 위한 게이트 구동회로 및 게이트 구동용으로 4개의 독립적인 전원이 필요하며, 여기에 안전운전을 위한 여러 가지의 보호 기능이 추가된다. 최근에는 이러한 기능을 모두 내장하고 부트 스트랩 회로를 사용하여 게이트 구동전원을 1개로 처리한 IPM 또는 SPM 소자가 개발되어 이를 사용하면 시스템의 비용 절감은 물론이고 제품의 소형화가 가능하다[4].

2.2 고성능 마이크로컨트롤러

벡터제어 인버터에서는 여러 가지의 제어 알고리즘 및 삼각함수를 사용한 좌표변환 등의 실시간 연산이 필요하므로 제어기가 고성능 부동소수점 연산형이어야 하며, 전

체 시스템의 소형화를 위해서 전동기 제어에 필요한 모든 I/O 기능이 하나의 칩에 내장된 마이크로컨트롤러인 것이 바람직하다.

정수 연산만 가능한 마이크로프로세서를 사용할 때는 삼각함수 등을 실시간으로 연산하는 대신에 미리 작성해 놓은 조건표(look-up table)를 참조하는 방법으로 처리하기도 하였으나, 부동소수점 연산형 DSP를 사용하면 이러한 연산을 실시간으로 수행하여 벡터제어 인버터를 쉽게 구현할 수 있다. 32비트 고성능 마이크로컨트롤러 코어인 Cortex-M4는 DSP 명령어 및 FPU 기능을 내장하고 있어서 기존의 부동소수점 연산형 DSP를 대체하는 저가격 컨트롤러로 사용할 수 있다[5].

2.3 전동기의 3상 전류측정

벡터제어 인버터에서는 전동기로 입력되는 3상 전류를 실시간으로 측정하는 것이 필수적으로 요구된다. 전통적으로 홀전류센서를 이용한 전류측정 방법을 널리 사용해왔지만 이는 가격이 비싸서 저가형 시스템에서는 사용하기 어렵다. 3상의 교류전류를 측정하기 위해서는 적어도 2개의 홀전류센서가 필요한데, 특히 소형 시스템에서는 이것의 부피도 문제가 될 수 있다.

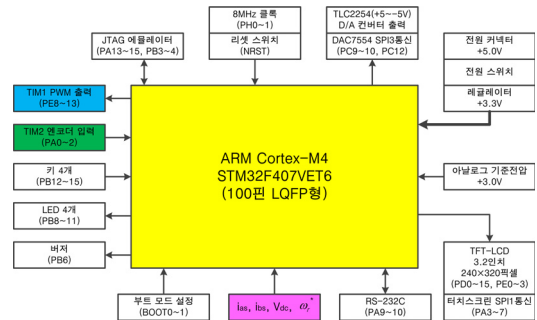
이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 셉트저항을 이용하여 전동기의 상전류를 측정하는 방법이 활발하게 연구되었다. 셉트저항을 이용한 전류측정 방법에는 직류링크의 하단에 1개의 셉트저항을 사용하여 유효벡터 구간에서 상전류를 측정하는 방법과, 3상 인버터의 아래쪽 스위치 하단에 3개의 셉트저항을 사용하여 영벡터 구간에서 상전류를 측정하는 방법이 있다[2]. 셉트저항을 이용한 이러한 전류측정 방법은 특정 유효벡터 또는 영벡터 구간에서만 전류를 측정할 수 있어서 사용할 수 있는 운전영역에 제한을 받으므로 이런 단점을 보완할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

2.4 전동기의 회전속도 측정

간접벡터제어 방식을 사용하는 오늘날의 모든 유도전동기 벡터제어 인버터에서 속도제어를 위해서는 물론이고 벡터제어 알고리즘을 적용하는데 필요한 자속각을 계산하기 위하여 전동기의 속도측정이 필수적으로 요구된다. 전동기의 회전속도를 측정하려면 로터리 엔코더와 같은 기계적인 장치를 전동기의 회전축에 부착해야 하므로 가격이 비싸고 설치가 까다로우며 사용 환경에 제한을 받는 경우도 있다.

현재 가전제품과 같은 저가형 양산제품에서 가격을 낮추는데 가장 어려운 부분이 바로 전동기의 회전속도 측

정인데, 이를 저가화한다면 1[kW]급 정도의 벡터제어 인버터를 수만 원대에 구현할 수 있다. 이 문제를 해결하려면 가전제품 회사에서 저가가격형의 로터리 엔코더를 개발하여 전동기에 내장하는 것이 바람직하다. 다른 방법으로는 별도의 속도측정 장치를 사용하지 않고 소프트웨어적으로 전동기의 회전속도를 추정하여 사용하는 센서리스 벡터제어 기술이 연구되고 있다[3].



[Fig. 2] Block diagram of inverter control board

3. Cortex-M4를 사용한 벡터제어 인버터

ARM Cortex-M4는 32비트 RISC 구조의 마이크로프로세서로서 고속 연산을 위한 DSP 명령어를 지원하며, 삼각함수, 지수함수, 제곱근 등의 부동소수점 연산을 실시간으로 처리하는 단정도의 FPU를 내장하고 있다. 이는 고성능의 부동소수점 연산처리 성능을 가지면서도 소비전력이 매우 적고 가격이 저렴하여 전동기 제어를 비롯한 전력제어, 산업용 자동화, 자동차, 멀티미디어 분야에 적합한 특성을 가지고 있다[5][6][7].

본 논문에서는 STMicroelectronics사의 Cortex-M4형 마이크로컨트롤러 STM32F407VET6을 사용하여 벡터제어 인버터를 설계하였으며, 컨트롤 보드의 블록도는 Fig. 2와 같다.

3.1 STM32F407VET6의 특징

STM32F407VET6은 32비트 부동소수점 연산형 마이크로컨트롤러로서 전동기 제어에 필요한 I/O 기능을 모두 갖추고 있어서 단일 소자로 간단하게 시스템을 구성하는 것이 가능하다. 이것은 최고 168[MHz]의 높은 시스템 클럭 주파수로 동작하며 소비전력이 1[MHz]당 230 [μ A]로 저전력형이고, 기존의 DSP 소자에 비하여 가격이 매우 낮아서 가전제품과 같은 양산용 제품에 적용하기 유리하다.

Table 1에 STM32F407VET6의 주요 특징을 요약한다.

[Table 1] Features of STM32F407VET6

Item	Features
CPU	<ul style="list-style-type: none"> • ARM 32bit Cortex-M4F core • System clock of max. 168[MHz] • 210DMIPS • Single precision FPU • DSP instruction
Memory	<ul style="list-style-type: none"> • 512KB Flash Memory • 192KB SRAM
Peripherals	<ul style="list-style-type: none"> • 3 × 12bit A/D converter • 12 × 16bit timer • 2 × 32bit timer • PWM output and encoder interface mode

3.2 벡터제어 알고리즘의 연산속도 비교

STM32F407VET6 마이크로컨트롤러를 벡터제어 인버터에 사용할 수 있는지를 판단하기 위하여 몇 가지 연산 처리 속도를 측정하고, 이를 TMS320F28335의 연산처리 속도와 비교하여 Table 2에 보였다.

[Table 2] Arithmetic performance of STM32F407VET6

Model	STM32F407VET6	TMS320F28335
System clock	168[MHz]	150[MHz]
sin(x)	0.68[μ s]	0.5[μ s]
cos(x)	0.68[μ s]	0.5[μ s]
Vector control	36[μ s]	27[μ s]
Compiler	IAR EWARM V6.30.6 arm_math of CMSIS	CCS V5.1.1 ramfuncs

여기서 보는 것처럼 STM32F407VET6의 부동소수점 연산 속도는 TMS320F28335보다 약 30% 정도 낮은 것으로 측정되었지만, 보통 벡터제어 인버터에서 1개의 전류 제어 또는 샘플링 주기를 100[μ s]로 설계하는데 비하여 실제 벡터제어 알고리즘을 처리하는 시간은 36[μ s]로 측정되었으므로 이는 벡터제어 인버터에서 충분히 만족할 만한 연산처리 속도이다.

3.3 전류제어 및 속도제어 알고리즘

본 논문의 실험용 벡터제어 인버터에서 전류제어는 타이머 TIM1이 0으로 될 때 마다 100[μ s]의 주기적인 인터럽트를 발생시켜 PI 제어기로 수행하였고, 속도제어는 5[ms]의 주기로 전동기의 회전속도를 측정하여 PI 제어 알고리즘으로 처리하였다.

3.4 전류 측정

전동기의 3상 전류를 검출하기 위해서는 적어도 두 상

의 전류를 측정하고 나머지 한 상은 이로 부터 계산하여 얻는다. 각 상의 전류는 홀전류센서를 사용하여 A/D 컨버터로 측정하며, 적어도 두 상의 전류를 동시에 읽어야만 나머지 상의 전류를 올바르게 계산할 수 있다.

TMS320F28x 계열의 DSP는 동시에 2채널을 A/D 변환할 수 있고 기준전압이 특정값으로 지정되는데 비하여, STM32F407VET6은 최대 3채널까지 동시에 A/D 변환이 가능하고 기준전압은 지정된 범위에서 임의로 인가할 수 있다. 특히 3채널을 동시에 변환할 수 있다는 것은 2개의 상전류와 직류링크 전압을 동시에 측정하거나 또는 3개의 선트저항을 사용하여 전류를 측정할 경우에 상당히 유리하다.

본 논문에서는 전류측정을 위하여 인버터의 a상과 b상 출력에 홀전류센서를 사용하였고, 여기에 직류링크 전압을 추가하여 3채널을 동시에 A/D 변환하였다.

3.5 회전속도 측정

전동기의 회전속도를 측정하려면 증가형 로터리 엔코더를 널리 사용한다. STM32F407VET6의 타이머에는 TMS320F28x 계열 DSP의 QEP기능과 유사하게 전동기의 회전속도와 방향을 측정하기 위한 Encoder interface mode를 가지고 있으며, M/T 방식을 사용할 수 있고 엔코더 신호를 4채배하여 속도측정의 분해능을 높일 수 있다.

본 논문의 실험용 인버터에서는 32비트 타이머 TIM2를 Encoder interface mode로 사용하였고, 3600[ppr]의 로터리 엔코더 신호를 4채배하여 전동기의 회전속도를 측정하였다.

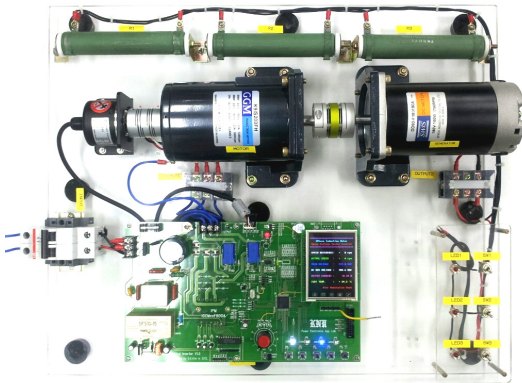
3.6 공간전압벡터 PWM

본 논문에서는 전류제어기의 응답특성이 우수하고 출력전류의 고조파가 적은 공간전압벡터 PWM(Space Voltage Vector PWM ; SVPWM)을 사용하여 3상 인버터를 구동하였다. SVPWM에서는 제어기가 요구하는 임의의 기준벡터를 생성하기 위하여 1개의 샘플링 시간 내에 2개의 인접벡터 및 영벡터를 3상 대칭변조법으로 인가한다[8]. 이러한 PWM 출력신호를 발생하는 기능은 STM32F407VET6과 TMS320F28x 계열 DSP가 거의 유사하여 2개의 독립적인 3상 대칭형 SVPWM 출력모듈을 가지고 있으며, 여기에 데드타임(dead time)을 부여하는 기능을 포함하고 있다.

본 논문에서는 16비트 타이머 TIM1을 사용하여 SVPWM을 구현하였고, 샘플링 시간은 100[μ s]로 하였으며, 데드타임은 1[μ s]로 설정하였다.

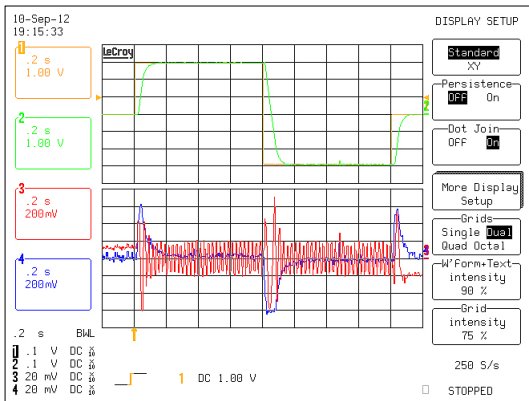
4. 실험 결과

본 논문에서 사용한 실험장치의 사진을 Fig. 3에 보였 다. 컨버터와 인버터로 구성되는 전력회로와 제어회로를 하나의 통합보드로 제작하였으며, 200[W]급 3상 유도전 동기와 직류발전기를 M-G세트로 구성하여 부하시험이 가능하도록 하였다. 모든 제어 프로그램은 C언어로 작성 하였고, 개발 툴로는 IAR EWARM과 저가형 에뮬레이터 ST-LINK/V2를 사용하였다.

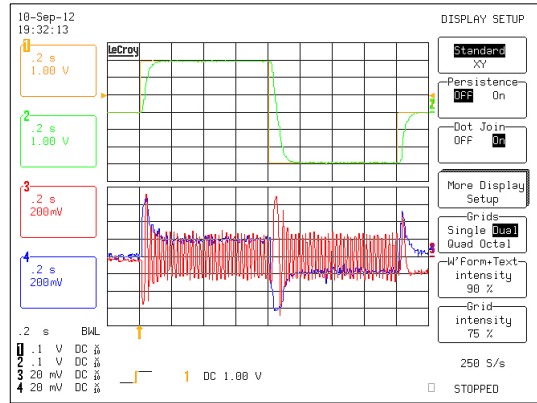


[Fig. 3] Photograph of experimental equipment

기동 및 가변속 특성 실험으로 전동기를 무부하와 1/2 부하에서 각각 기준속도 +1200[rpm]으로 스텝 기동하고, 0.8[sec] 후에 이를 -1200[rpm]으로 역회전시키며, 다시 0.8[sec] 후에 정지시킨 경우의 실험 결과는 Fig. 4와 같다. 벡터제어가 잘 수행되어 전동기의 회전속도가 기준속 도에 빠르게 응답하는 것을 볼 수 있다.

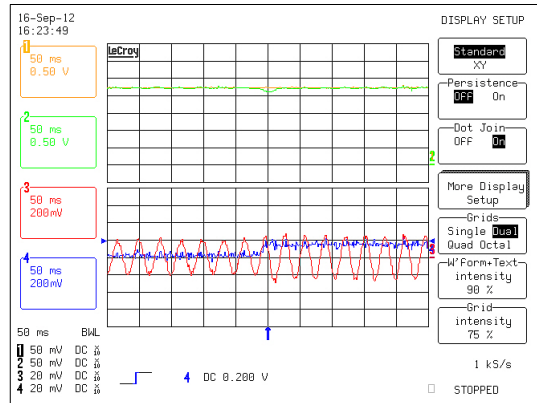


(a) No load test (+1200 → -1200 → 0[rpm])

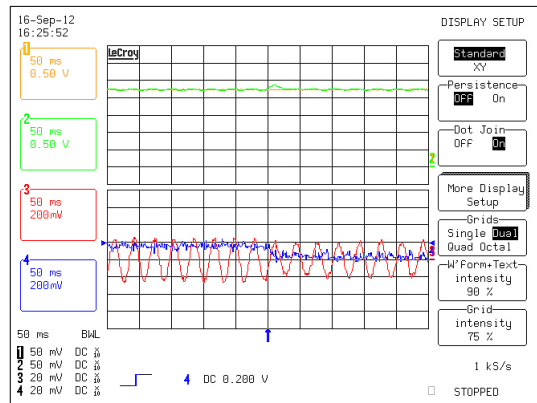


(b) 1/2 load test (+1200 → -1200 → 0[rpm])

[Fig. 4] Speed response characteristics of motor



(a) Load increment (no load → 1/2 load)



(b) Load decrement (1/2 load → no load)

[Fig. 5] Transient characteristics of load variation

부하 변동에 대한 과도응답 특성 실험으로 전동기를 +900[rpm]에서 무부하로 운전하다가 1/2부하를 스텝 인 가한 경우와 1/2부하로 운전하다가 무부하로 스텝 제거

한 경우의 실험 결과를 Fig. 5에 보였다. 부하가 갑자기 증가하는 경우에는 전동기 속도가 약간 감소하고, 반대로 부하를 제거한 경우에는 속도가 약간 증가하지만 곧 안정화되어 기준속도를 추종하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 DSP 기능이 내장된 32비트 ARM Cortex-M4 마이크로컨트롤러를 사용하여 가전제품 등을 위한 유도전동기의 저가형 벡터제어 인버터를 구현하였다. 이를 200[W]급의 3상 유도전동기에 적용한 결과 벡터제어 인버터를 수만 원대의 초저가로 구현할 수 있었으며, 기존의 전동기 제어용 DSP에 버금가는 양호한 벡터제어 성능을 확인함으로써 이제는 Cortex-M4 마이크로컨트롤러가 저가격으로 기존의 전동기 제어용 DSP 소자를 충분히 대체할 수 있다는 것을 보였다.

References

- [1] Jeong-Gyu Lim, Seok-Hwan Kim, Se-Kyo Chung, "Implementation of Compact Vector Control System for Induction Motor Using TMS320F2812 DSP and Smart Power Module", *Symposium of Power Electronics*, pp.11~14, 2004.
- [2] Seung-Min Shin, Jong-Soo Kim, Rae-Kwan Park, Byoung-Kuk Lee, In-Soung Jung, "Analysis of variable speed motor drive performance according to current sensing methods", *ICEMS(International Conference on Electrical Machines and Systems)*, pp. 748~752, Oct. 2010.
- [3] Seung-Ki Sul, Bong-Hyun Kwon, Jun-Koo Kang, "A Study on the Vector Control of Induction Motor Based on Speed Estimation", *Journal of KIEE*, Vol. 39, No. 9, pp. 928~933, 1990.
- [4] LS Power Semitech, CIPOS IGCM06F60GA datasheet, 2011.
- [5] ARM, Cortex-M4 Technical Reference Manual, 2010.
- [6] STMicroelectronics, STM32F405xx, STM32F407xx data sheet, 2012.
- [7] STMicroelectronics, RM0090: STM32F4xx Reference Manual, 2011.
- [8] Duck-Yong Yoon, Soon-Chan Hong, "Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Space Voltage Vector PWM", *Journal of KIEE*, Vol. 43, No. 7, pp. 1112~1120, 1994.

김 동 기(Dong-Ki Kim)

[준회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 전기전자제어공학부 제어계측공학전공
- 2011년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 전기전자제어공학과 석사과정
- 2009년 1월 ~ 현재 : (주)ABB코리아 산업자동화사업본부 저압 드라이브사업부 품질보증팀 근무

<관심분야>

3상 유도전동기 벡터제어, 풍력발전 시스템

윤 덕 용(Duck-Yong Yoon)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 1995년 2월 : 단국대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1982년 12월 ~ 1984년 5월 : 삼성전자 종합연구소 주임연구원
- 1985년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 전기전자제어공학부 교수

<관심분야>

전동기 서보제어, 마이크로프로세서 응용 설계