

연료 전지 BOP 내장 터보 블로어용 초고속 영구자석 동기전동기 드라이버 구현

최순호, 부우충기엔, 차한주
충남대학교 전기공학과

Implementation of Super High Speed PMSM Driver for Turbo blower in Fuel Cells BOP

Soonho Choi, Vu Trung Kien, Hanju Cha
Department of Electrical Engineering in Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서는 TMS320F2812를 이용하여 연료 전지 BOP(Balance of Plant) 내장 터보 블로어로 쓰이는 영구자석 동기전동기의 센서리스 공간 벡터 제어를 구현하였다. 고속으로 회전하는 회전자 위치 및 속도는 측정하기가 어려우므로, 전류를 이용하여 위상 및 속도를 추정하였으며, 이 알고리즘을 Digital Signal Processor(DSP) 상에서 구현하였다. 전류 측정시 노이즈에 의한 영향을 최소화하기 위해 외부에 12bit급 AD컨버터인 AD7891을 장착하였다. 데드타임 보상 및 dc-link 전압 리플 보상을 적용하였고, 정격 속도 100,000rpm에서 영구자석 동기전동기를 구동하였다.

1. 서 론

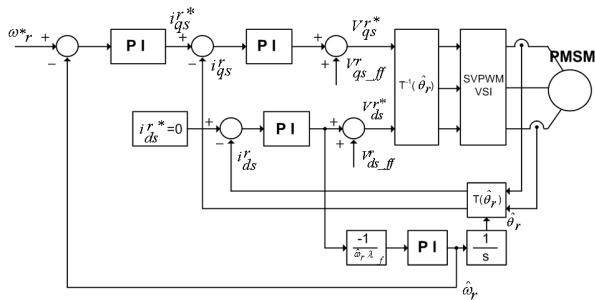
최근 전력 산업 분야에서는 화석 연료의 고갈에 대한 대비와 환경 오염에 따른 지구 온난화 등의 이유로 환경 친화적 에너지원의 개발에 관심이 집중되고 있다. 새로운 발전 방식으로 태양광, 풍력, 연료 전지 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 연료 전지는 발전 중에 상당한 열을 발생하게 된다. 따라서 연료 전지의 온도 제어를 위해 BOP(Balance of Plant) 시스템에 터보 블라워가 사용된다.

연료 전지에서 발생하는 열을 방출하기 위해 사용되는 터보 블라워는 표면 부착형 영구자석 동기전동기로, 그 회전속도는 100,000rpm에 달한다. 일반적으로 전동기의 속도 제어를 위해서는 회전자의 속도 및 위상 정보가 필수적이며, 주로 엔코더나 리졸버같은 부가적인 회로를 이용하여 측정하게 된다. 하지만 고속으로 회전하는 경우에는 엔코더나 리졸버의 분해능이 충분하지 않기 때문에 측정값에 상당한 오차를 포함하게 된다. 따라서 본 논문에서는 전동기에 흐르는 전류를 측정하여 회전자의 속도 및 위치 정보를 추정하는 센서리스 공간 벡터 제어 방식을 적용하였다.[1][2]

따라서 본 논문에서는 TMS320F2812 DSP를 이용하여 영구 자석 동기 전동기의 센서리스 공간 벡터 제어를 구현하였으며, 정격 속도 100,000rpm에서 운전하였다.[3] 인버터의 암 단락(Arm Short)을 막기 위해 2μsec의 데드타임을 적용되었으며, 데드타임 보상 알고리즘을 적용하였다. 그리고 정류 회로의 dc-link에 존재하는 120Hz 전압 리플 성분을 보상하였다.

2. 센서리스 벡터 제어기 구성

그림1은 표면 부착형 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어를 위한 블록도이다. 교류 전동기 벡터 제어 시스템은 벡터제어 알고리즘을 포함한 제어기, 교류 전동기에 전압을 공급하기 위한 인버터, 교류 전동기 이렇게 크게 3부분으로 구성된다. 본 논문을 통해 구현한 벡터 제어기는 기준좌표를 변환하기 위한 Clark's 변환, Park's 변환, 그리고 이에



<그림 1> 센서리스 벡터 제어 블록도

대한 역변환, 속도 제어와 전류 제어를 위한 PI 제어기, 3상 인버터의 게이트 신호를 발생하기 위한 공간 벡터 PWM, 외부 소자 인터페이스 등으로 구성된다.

교류 전동기의 벡터제어를 위해서는 전동기의 회전자 위치정보와 속도 정보가 필수적이다. 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어를 위해 본 논문에서는 d축 전류 제어의 오차를 이용한 간단한 센서리스 제어 기법을 사용하였다. 전향 보상 성분 $V_{ds_ff}^r$, $V_{qs_ff}^r$ 는 아래 수식과 같이 주어진다.[1]

$$V_{ds_ff}^r = R_s i_{ds}^{r*} - L_s \hat{\omega}_r i_{qs}^{r*} \quad (1)$$

$$V_{qs_ff}^r = R_s i_{qs}^{r*} + L_s \hat{\omega}_r i_{ds}^{r*} + \hat{\omega}_r \lambda_f \quad (2)$$

여기서 $\hat{\omega}_r$ 은 전기각으로 표시된 회전자의 추정 각속도이며 $L_s = L_m + L_s$ 이다.

과도 상태를 무시하면 표면 부착형 영구자석 전동기의 전압 방정식은 추정된 기준 좌표계(추정된 회전자의 d축에 동기된 좌표계)에서 다음 식과 같다.

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^{r*} - L_s \omega_r i_{qs}^{r*} + \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \quad (3)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^{r*} + L_s \omega_r i_{ds}^{r*} + \omega_r \lambda_f \cos \theta_{err} \quad (4)$$

여기서 θ_{err} 은 실제 회전자의 회전각 θ_r 과 추정된 $\hat{\theta}_r$ 과의 차이이다.

식 (1)과 (3)으로부터 각 오차 θ_{err} 가 있을 때, 추정된 d축에서의 전압 오차는 식 5와 같이 표시될 수 있다.

$$V_{ds_error}^r = R_s (i_{ds}^r - i_{ds}^{r*}) - L_s \omega_r (i_{qs}^r - i_{qs}^{r*}) + \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \quad (5)$$

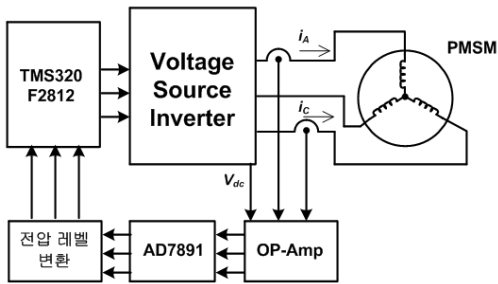
만약 d,q 축 전류가 전류 제어기에 의해 기준 전류를 잘 추종하도록 제어되고 또한 θ_{err} 가 작은 범위에 있다면 ($\theta_{err} \approx \sin \theta_{err}$), d축 전류 제어기의 출력 $V_{ds_fb}^r$ 은 다음 식과 같이 근사화 될 수 있다.

$$V_{ds_fb}^r = V_{ds_error}^r = \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \approx \omega_r \lambda_f \theta_{err} \quad (6)$$

식 (6)의 d축 전류 제어기 출력을 추정된 속도와 전동기 정수 λ_f 로 나눈 후 이를 비례적분 제어기의 입력으로 하고 비례 적분 제어기의 출력을 추정 회전자 각속도 $\hat{\omega}_r$ 로 두면, 비례 적분 제어기는 θ_{err} 을 0으로 만들기 위해 회전자 속도를 조절하게 된다. 제어를 위한 추정각 $\hat{\theta}_r$ 은 $\hat{\omega}_r$ 을 적분함으로써 쉽게 구할 수 있다.

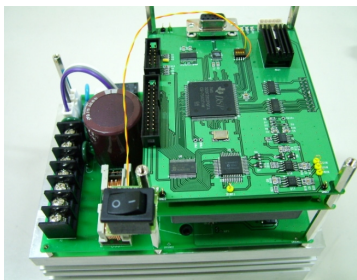
3. 초고속 PMSM 드라이버 구성

그림2에 나타난 바와 같이, PMSM의 센서리스 공간 벡터 제어를 위해서는 2상의 전류 및 dc-link 전압을 정확히 검출해야 하며, 정확도에 따라 시스템의 운전 성능이 결정된다. 본 논문에서는 전류 검출을 위하여 홀 센서 PDA05V4B를 사용하였고, 전압 검출을 위하여 절연 증폭기 HCPL788J를 사용하였다. TMS320F2812의 경우 아날로그 입력이 0~3V로 제한되어 있으므로, 내부 AD를 사용하려면 센서에서 받은 아날로그 정보가 이 범위의 값을 가지도록 연산 증폭기의 이득과 오프셋을 적당히 조정하여 전류 센서의 출력 값 4V를 0~3V로 재조정하여야 한다. 이 경우 작은 외부 노이즈에 의해 디지털 값으로 변환된 정보는 큰 오차를 포함할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 ADC 전용 소자로 12비트 8채널



〈그림 2〉 PMSM 드라이버 구성도

을 가지며 $\pm 10V$ 범위의 입력을 갖는 AD7891을 사용하였다. TMS320F2812는 매 샘플링 시간마다 ADC 제어신호를 발생하고, ADC는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. AD 컨버터는 a상과 c상의 전류 정보와 dc-link 전압 정보를 디지털 신호로 변환하여 TMS320F2812에 전달한다. 이렇게 ADC로부터 입력받은 디지털 정보에 최소비트 분해능을 곱하여 실제 전류값으로 변환하여 제어 알고리즘에서 사용한다.



〈그림 3〉 초고속 PMSM 드라이버 사진

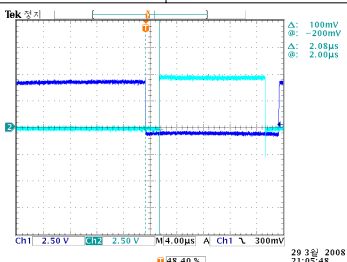
그림3은 본 논문에서 사용된 PMSM 및 제어회로를 포함한 인버터 시스템이다. 인버터와 PMSM 사이에는 스위칭 시 발생하는 전압의 스위칭 리플을 필터링하기 위해 인덕터를 달았다. 제일 아래에는 IPM 및 Vdc를 만들기 위한 정류회로, 전류센서 등을 포함한 인버터 전원부가 있다. 중간 층에는 DSP 및 각종 IC 소자들에 전원을 공급하기 위해 두 개의 SMPS를 장착하였으며, 윗 층에는 TMS320F2812 및 OP-Amp, AD7891 등을 포함한 제어회로가 있다. 또한 D/A card를 장착하여, 프로그램 상의 주요 변수를 모터 구동시 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다.

3. 실험 결과

표1에 PMSM 드라이버의 사양을 나타내었다. 정격 DC 전압은 220VAC를 다이오드 정류기를 통해 얻을 수 있으며, 스위칭 주파수는 100,000rpm시 기본 주파수가 1.67kHz임을 고려하여 정하였다.

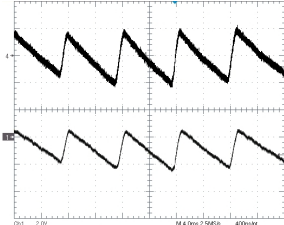
〈표 1〉 인버터 및 제어기 사양

부품	품명
정격 DC 전압	300VDC
스위칭 주파수	20kHz
DSP	TMS320F2812
IGBT	PS21064
A/D 컨버터	AD7891
전류 센서	PDA05V4B
전압 절연 증폭기	HCPL788J



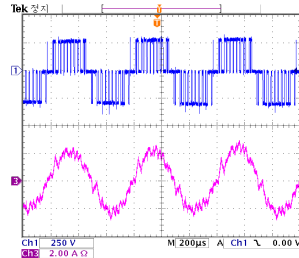
〈그림 4〉 데드타임 측정 (2.5V/div, 2 μ sec/div)

인버터의 암 단락(Arm Short)를 막기 위해 데드타임 적용이 필수적이다. 본 논문에서 사용된 데드타임은 2 μ sec이며, 그림4는 IPM에 설계 인가되는 스위칭 신호를 측정된 것이다. 전류를 측정하고 그 값이 센서리스 공간 벡터 제어 알고리즘을 거치면 3상의 전압 지령치가 출력된다. 이 값이 스위치에 인가될 때, 데드타임 만큼의 전압인 24V가 덜 인가될 때 때문에, 데드타임 보상 알고리즘을 제어기에서 구현하였다.



〈그림 5〉 dc-link 전압리플과 저역통과필터를 거친 전압리플 (2V/div, 4msec/div)

그림5에서 보듯이 dc-link 전압은 220VAC 전압을 다이오드에 의해 정류하였기 때문에 120Hz 성분의 저주파수 리플이 존재하게 되며, 이 리플은 전동기 제어의 안정도에 영향을 미친다. 따라서 dc-link전압을 저역통과필터를 통해 측정하여, 인버터의 출력 전압 지령에 보상하였다.



〈그림 6〉 100,000rpm에서의 선간 전압 V_{ab} 및 선전류 i_a (250V/div, 2A/div, 200 μ sec/div)

그림6은 PMSM을 100,000rpm에서 운전했을 때 인버터의 출력 선간전압 V_{ab} 및 선 전류 i_a 이다. 전류의 첨두치는 약 2.2A이며, 이 때 주파수는 1.67kHz이다.

4. 결 론

본 연구에서는 연료 전지 BOP(Balance of Plant)에 사용되는 터보 블로어용 영구자석 동기전동기를 위상각 추정기법을 이용한 센서리스 벡터 제어를 이용해 정격 속도 100,000rpm으로 구동하였다. 이를 위해 전동기 제어용 고성능 DSP인 TMS320F2812를 이용하였으며, DSP가 가진 고정 소수점 연산의 한계를 각 변수들의 스케일링 및 150MHz의 고속 연산으로 극복하였다. 전류의 극성을 기준으로 데드타임 보상 알고리즘을 적용하였으며, dc-link에서 발생하는 120Hz의 저주파수 전압 리플 성분을 저역통과필터를 통해 읽어들이고 후 보상하였다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2007-1-015-03) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

[1] 설승기, "전기기기 제어론", 홍릉과학출판사, pp. 392~396, 2002.
 [2] 최치영, 홍선기, 김수길, "고성능 DSP기반의 FA용 AC서보 시스템에 관한 연구", 조명전기설비학회논문지 제18권 제1호, pp.67~72, 2004.
 [3] 김민희, 임태훈, 정장식, 김성호, "TMS320F2812 DSP를 이용한 산업용 SPMSM 정밀 제어시스템 개발", 전력전자학회 논문지, 제10권 제2호, pp.138~147, 2005.
 [4] 김석환, 임정규, 서은경, 신희범, 이현우, 정세교, "FPGA를 이용한 영구자석 동기 전동기 벡터 제어기의 구현", 전력전자학회 논문지 제11권 제2호, pp.127~134, 2006.