

직접 구동방식의 터보 압축기를 위한 초고속 전동기 구동 시스템 개발

권정혁, 변지섭, *최중경

삼성테크윈 파워시스템연구소 전기전자LAB.

*창원대학교 산업전자제어연구실

전화: 055-260-2869/*055-281-9343

The Development of a super high speed motor driving system for the direct drive turbo compressor

Jeong-Hyeck Kwon, Ji-Seob Byen, *Jung-Keying Choi

Samsung Techwin Power System R&D Center, Electric and Electronic Lab.

*Dept. of Electronics Engineering, Changwon University

E-mail : chyby@samsung.co.kr /*cjk@sarim.changwon.ac.kr

Abstract

There are screw, reciprocating type turbo compressor by structure in an air compressor which is essential equipment on the industrial spot. Recently, the application range of a turbo compressor tend to be wide gradually. And this type of compressor needs high speed rotation of impeller in structure so high ratio gearbox and conventional induction motor driving required. This mechanical system have results of increased moment of inertia and mechanical friction loss. Recent studies of modern turbo compressor have been applied to developing super high speed BLDC motor and driver which remove gearbox that make its size small and mechanical friction loss minimum. To accomodate this tendency, we tried to develop a super high speed motor drive system for 150Hp, 70,000rpm direct drive Turbo compressor using DSP(Digital Signal Processor) and SVPWM(Space Vector Modulation PWM) technique. The results of this specific application show that super high speed driver and controller could be implemented well with digital electronics.

1. 서론

터보압축기는 그 구조상 고압의 압축공기와 높은 공력

효율을 위해서 임펠러의 고속도 운전이 요구된다. 이를 구현하기 위하여 종래의 터보압축기는 범용 전동기(1800, 3600rpm)에 기어박스를 설치하여 10:1, 20:1 혹은 그 이상의 기어비로 증속을 하여 구현되었다. 그러나 기어박스와 기어박스 냉각시스템으로 말미암아 시스템은 크고 복잡해졌으며, 높은 기어비를 가진 기어박스는 구동부의 관성모멘트를 증가시켜 추가적인 기계 마찰손을 유발하였다. 그러므로 고속 직접 구동방식의 터보압축기를 구현하게 되면 압축기 시스템에서 증속용 기어박스를 제거할 수 있고, 따라서 시스템이 간단 및 소형화되고, 기어박스에 의한 손실이 제거됨에 따라 효율 또한 증가시킬 수 있다. 이러한 이유로 고속 구동기에 관한 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있다.[1][2]

이를 개발하기 위해서는 초고속 전동기 구동시스템의 구현이 선행되어야 하는데, 이에 적용 가능한 초고속 전동기로는 기존의 유도전동기 외에 영구자석형 동기전동기가 활발히 연구 개발되고 있다. 여러 연구에 의하면 효율 면에서 영구자석형 동기전동기가 뛰어나며, 제작 가격적인 측면을 고려해도 유도전동기가 보다 유리하다는 연구 결과가 있다.[2]

전동기뿐 아니라 해당 전동기를 구동 할 제어기와 인버터 개발도 연구가 진행되고 있는데, 이에 대한 구현은 인가주파수 및 인가전류를 제어하는 방법에 있어서 크게 2가지 부류로 분류 할 수 있다. 그 중 하나는 범용 인버터와 같이 6개의 IGBT로 가변 진폭 및 주파수의 교류를 구현하는 방법과 나머지 하나는 6개의 IGBT로 주파수를 발생시키고 컨버터 회로에서 인가전압을 가변하는 2중 구조의 인버터들이 개발되고 있다.[3] 후자는 초고속 동기전동기의 일반적인 제어방식으로 초고속 동기전동기의 경우 전동기의 상 인덕턴스가 수 십 마이크로

로 헨리(μH)로 그 값이 매우 작아 전류제어에 많은 어려움이 있고, 고속 회전으로 인한 각각의 IGBT 스위칭 주파수를 낮출 의도로 개발된 구조이다. 하지만, 최근의 연구에 있어서는 전자와 같이 초고속 전동기 구동 시스템에 인버터의 구조가 범용 인버터의 구조를 지니고 있는 경우가 선호되고 있다. 이는 공간벡터 PWM의 우수성, 벡터제어기법 및 DSP 기술의 발달에 그 기본을 두고 있다. [4]

본 논문에서는 공간벡터변조 PWM 발생기를 현대의 FPGA 칩에 구현하며, 벡터제어 연산을 위한 32비트 부동소수점 연산전용의 DSP 및 고속의 안정한 인버터를 위해 IGBT 모듈을 사용하는 초고속 터보압축기를 위한 BLDC 전동기 속도제어 시스템을 설계한다.

2. 본론

일반적인 3상 영구자석 동기전동기의 등가회로는 그림 1과 같고 이에 따른 전압방정식, 파워 및 토크 방정식은 식(1)~(3)과 같이 표현되어진다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$P = e_a \times i_a + e_b \times i_b + e_c \times i_c$$

$$T = P / \omega_m = (e_a \times i_a + e_b \times i_b + e_c \times i_c) / \omega_m \quad \text{--- (1)}$$

제어 방식에 따라 전압, 파워 및 발생토크 방정식이 다르게 표현되는데, 이들 모두는 식(1)에 근거하고 있다.

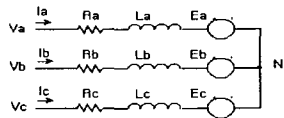


그림 1. 3상 동기전동기 등가회로
Fig 1. 3 Phase synchronous motor circuit

2.1 PMSM 동기전동기 벡터제어 구동시스템

초고속 구동 시스템에 사용된 전동기는 표면부착형 영구자석형 동기전동기로 그 역기전력은 정현파 형태이다. 그리고 벡터제어기법과 공간벡터변조 PWM 기법을 이용하여 전동기 제어기를 구현하였다.

동기전동기는 영구자석인 회전자에 위치의 따라 최대 토크를 발생하는 자속성분 전류벡터의 위치가 변하게 된다. 하지만 이를 회전자인 영구자석의 시각으로 보면 2차원 공간에서 항상 일정한 위치에 놓이게 되고 전자적인 정류동작을 통해 토크성분 전류벡터의 기능이 직류전동기의 전기자전류의 기능과 같게 된다. 이를 위해

서는 좌표계 변환이 필요한데 식(1)과 같은 고정자 3상 좌표계에서 고정자 2상 정지좌표계로 또 영구자석 회전자에 기준을 둔 2상 동기좌표계로의 변환이 필요하다. 이 변환의 결과로 2상 동기좌표 d-q 전압방정식은 식(3)과 같이 표현되어진다. 벡터제어는 이렇게 자속축 전류와 토크축 전류를 분리하여 제어하는 것을 뜻하며, 특히 자속축 전류를 영으로 하여 제어하면 이때 발생하는 토크는 식(4)와 같이 간단히 표현된다.

$$T(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{--- (2)}$$

$T(0)$: 3상 정지좌표계 -> 2상 정지좌표계

$R(\theta)$: 2상 정지좌표계 -> 2상 동기좌표계

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^r \\ V_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega \times L_s \\ \omega \times L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \times \lambda_f \end{bmatrix} \quad \text{--- (3)}$$

$$T = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} \times \lambda_f \times i_{qs}^r \quad \text{--- (4)}$$

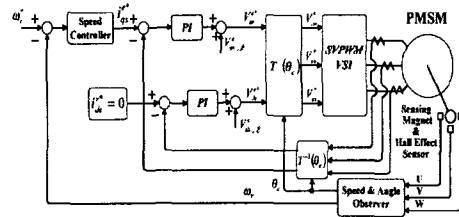


그림 2. 고속 영구자석 동기전동기 벡터제어기
Fig 2. Vector Control System for High Speed PMSM Motor

특히 벡터제어기에서 토크축 전류(i_{qs}^r)와 자속축 전류($i_{ds}^r=0$)를 분리하여 각각을 독립제어 할 수 있는 비간섭제어기를 사용하였으며, 이를 위해 전류제어에서 상호간섭부분과 비선형분을 전향보상하여 상쇄시켰다. 전향보상기는 식(5)와 같다. [5]

$$V_{ds}^r - ff = -\omega \times L_s \times i_{qs}^r$$

$$V_{qs}^r - ff = \omega \times L_s \times i_{ds}^r + \omega \times \lambda_f \quad \text{--- (5)}$$

전향보상기의 결과로 식(3)의 전압방정식이 서로 독립적인 선형방정식이 되었다. 그림2에서 보는 바와 같이 i_{qs}^r , i_{ds}^r 는 각각 별도의 PI 제어기로 구현되었다. 전류제어기에서 생성된 동기좌표계 전압지령 V_{ds}^r , V_{qs}^r 는 공간벡터변조기에 응용되기 위해 회전자의 절대위치 정보와 좌표변환 공식에 의해 V_{ds}^s , V_{qs}^s 값으로 변환되어야 한다. 이 정지좌표계 전압 벡터를 구현하기 위한

PWM 펄스가 인버터를 구동하여 실질적으로는 전동기에 인가되는 V_a, V_b, V_c 를 생성하게된다. 전류제어기는 좌표계변환, 공간벡터 PWM 도입 등의 이유로 이전에 비해 매우 복잡해졌지만 6개의 IGBT로 전류, 전압의 가변진폭, 가변주파수발생이 가능해졌다.

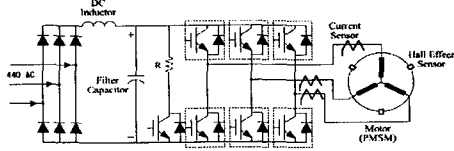


그림 3. 동기전동기 벡터제어기 강전 회로
Fig 3. Vector Driver Power Circuit

3. 실험 파형 및 비교 검토

그림4는 70,000rpm 무부하 시 벡터제어기에서의 DC 링크 입력전류(CH1,1A/1mA)와 출력전류 파형 U상(CH2,40A/V), V상(CH3,40A/V), W상(CH4,40A/V)을 도시한 것이다.

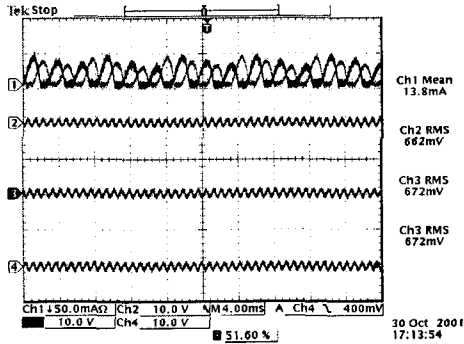


그림 4. 벡터 드라이버 Idc,U,V,W상 전류
Fig 4. Vector Driver Idc,U,V,W Phase Current

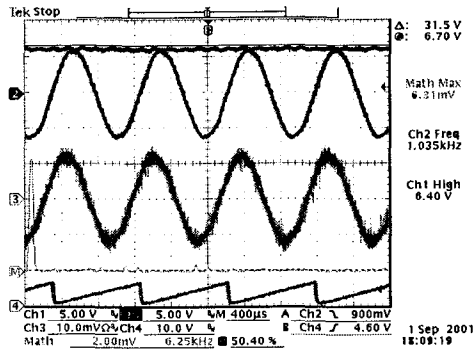


그림 5. 벡터 인버터 U상 전류파형
Fig 5. Vector driver U phase current

그림5는 62,000rpm에서 100마력 출력시 제어기에서의 i_{qs}^r (CH1,40A/V), U상 전류(CH2,40A/V), 전류 센서(Tektronix A6042XL,AM503B)를 사용하여 측정된 U상 전류(CH3,200A/10mA) 및 회전자의 절대 위치 정보(CH4)를 비교한 것이다. i_{qs}^r 값과 U상 전류의 피크 값이 일치하고 62000rpm의 출력 전류파형이 정현파를 유지하고 있는 것을 보면 고속 부하 시에도 벡터제어가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 벡터제어 인버터는 그 제어기 구성이 복잡하나 디지털 제어기를 도입하여 이들 대부분이 S/W로 구현되어지고, 공간벡터 PWM 발생기가 FPGA로 구현되면서 하드웨어는 이전에 비해 훨씬 간단해졌다.

4. 결론

국내, 외의 선행 연구가 거의 전무한 상태에서 70,000rpm, 150마력(115kW) 터보압축기 구동시스템을 구현하기 위하여 초고속 영구자석형 동기전동기 구동시스템을 설계하여 실험하였다. 영구자석 동기전동기에 대한 벡터제어 및 공간벡터변조 PWM 기법을 확장 응용하여 고속기에 적용하였다.

설계된 제어 및 구동시스템을 통해 간단한 기존의 인버터 구조를 가지고 원하는 정도의 제어 특성을 얻을 수 있었다. 이는 DSP를 이용한 디지털 제어기, 공간벡터 PWM 및 동기전동기 벡터제어기법의 우수성에서 기인한 결과로 파악된다. 이번 연구를 근거로 70,000rpm, 150마력 터보형 압축기를 위한 초고속 대용량 영구자석형 동기전동기 구동시스템을 설계, 제작 할 수 있었으며, 이를 삼성테크윈 초소형 압축기 MC150에 적용할 수 있었다.

*. 전동기 파라메타 : $R_s = 0.0005 \Omega$,

$L_s = 0.000028 \mu H$, $\lambda_f = 0.036 \text{ V/rad/sec}$

**. 본 논문은 과학기술부 중점국가사업개발의 일환으로 지난 3년(1998년~2001년)간 진행되었던 삼성테크윈의 직접구동방식 터보압축기 개발을 위한 연구 중 70,000rpm, 150마력 전동기 구동시스템 구현에 관한 연구성과의 일부분을 정리한 것임

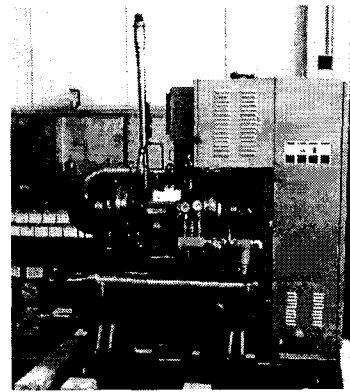


그림 6. 150마력 70,000rpm 터보 압축기
Fig 6. 150Hp 70,000rpm Turbo Compressor (Samsung Techwin)

참 고 문 헌

- [1] High Speed Motor Driver for Industrial Applications, Movhoub Mekhiche, James L. Kirtley, Mary Tolikas,
- [2] Novel High Speed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor, Wen L Soong, Gerald B Kliman, Roger N Jonson, Raymond A White, Joseph E Miller, IEEE, ISA, VOL 36, 2000
- [3] A Super High Speed PM Motor Drive System by Quasi-current Source Inverter, I.Takabashi, T.Koganezawa, IEEE ISA vol 30, no 3, 1994
- [4] Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control schemes for PMSM in Super High Variable Speed Operation, Longya Xu, Chagjiang Wang, IEEE/ISA 1998
- [5] Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High Speed PMSM of Turbo-Compressor Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong-Hyeck Kwon, Jong-Sub Shin, IEEE/ISA Cicago Annual Meetig, 2001