
직접 구동방식의 터보 압축기를 위한 초고속 영구자석형 동기전동기 센서리스 벡터 구동 시스템 구현

권정혁 · 변지섭 · 최중경* · 류한성*

The Development of Super High Speed PMSM Sensorless Vector driver for Direct Drive Method Turbo Compressor

Jeong-hyeck Kwon · Ji-seob Beyon · Jung-keying* · Hang-seong Ryu*

요약

산업 현장에서 필수적인 설비인 공기 압축기는 스크루, 왕복동 및 터보 압축기가 사용되고 있다. 근래에 터보 압축기가 많이 사용되고 있는데, 터보 압축기는 구조적으로 임펠러를 고속회전 시켜야한다. 범용전동기에 높은 기어비를 가진 기어박스를 이용하여 구현하였는데, 이는 관성 모멘트, 마찰손 및 압축기의 크기를 증가시켰다. 최근에 터보 압축기의 연구는 초고속 동기전동기를 장착하여 기어박스를 제거하여 크기와 마찰손을 최소화하는 방향으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 150마력 70,000rpm 직접 구동방식의 터보 압축기를 개발하기 위하여 초고속 동기전동기 센서리스 벡터 구동시스템을 개발하였고, 이를 적용하여 직접 구동 방식 터보 압축기를 개발하였다.

ABSTRACT

There are screw, reciprocating and turbo compressor by structure in an air compressor, essential equipment on the industrial spot. Resently it is wide that the range of turbo compressor's use in gradual, turbo compressor needs high speed rotation of impeller in structure, high rated gearbox and conventional induction motor. This mechanical system increased the moment of inertia and mechanical friction loss. Resently the study of turbo compressor applied super high speed motor and drive, removing gearbox made its size small and mechanical friction loss minimum. In this study we tried to develope variable super high speed motor drive systems for 150Hp, 70,000rpm direct drive Turbo compressor. The result of study is applied to a 150Hp direct turbo compressor and makes it goods.

1. 서론

터보압축기는 그 구조상 고압의 압축공기와 높은 공력효율을 위해서는 임펠러의 회전속도가 일정한 영역 안에서 운전되어야 한다.[1] 일반적으로 임펠러의 고속운전을 필요로 하고, 이를 구현하기 위하여 종래의 터보압축기는 범용 전동기(1800, 3600rpm)에

기어박스를 설치하여 10:1, 20:1 혹은 그 이상의 기어비로 증속을 하여 구현되었다. 기어박스와 기어박스 냉각시스템으로 말미암아 시스템은 크고 복잡해졌으며, 높은 기어비를 가진 기어박스는 구동부의 관성모멘트를 증가시켜 추가적인 기계 마찰손을 유발하였다. 고속 직접구동방식의 터보압축기를 구현하게 되면 압축기 시스템에서 증속용 기어박스를 제

*삼성테크윈 파워시스템연구소 전기전자 LAB

*창원대학교 전자공학과 산업전자제어연구실

거할 수 있고, 따라서 시스템이 간단 및 소형화되고, 기어박스에 의한 손실이 제거됨에 따라 효율 또한 증가시킬 수 있다. 이러한 이유로 이와 유사한 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있다.

이를 개발하기 위해서는 초고속 전동기 구동시스템의 구현이 선행되어야 하는데, 이에 적용 가능한 초고속 전동기로는 영구자석형 동기전동기, 유도전동기, SRM 등이 연구, 개발되고 있다. 논문에 의하면 효율은 영구자석 동기전동기가 뛰어나며 제작 가격적인 측면을 고려하면 유도전동기가 보다 유리하다는 연구 결과가 있다. 전동기뿐 아니라 해당 전동기를 구동할 제어기와 인버터 개발도 연구가 진행되고 있는데, 이에 대한 구현은 인가주파수 및 인가전류를 제어하는 방법에 있어서 크게 2가지 부류로 분류할 수 있다. 그 중 하나는 범용 인버터와 같이 6개의 IGBT로 구현하는 방법과 나머지 하나는 6개의 IGBT로 주파수를 발생시키고 컨버터 회로에서 인가전압을 가변하는 2중 구조의 인버터들이 개발되고 있다. 후자는 초고속 동기전동기의 일반적인 제어방식으로 초고속 동기전동기의 경우 전동기의 상인덕턴스가 수십 마이크로 헨리[μH]로 그 값이 매우 작아 전류제어에 많은 어려움이 있고, 고속회전으로 인한 여섯 개 IGBT의 필요 스위칭 주파수를 낮출 의도로 개발된 구조이다. 하지만, 최근의 연구에 있어서는 전자와 같이 초고속 전동기 구동 시스템에 인버터의 구조가 범용 인버터의 구조를 지니고 있다. 이는 공간벡터 PWM의 우수성, 벡터제어기법 및 DSP 기술의 발달에 그 기본을 두고 있다.[2~6]

본 논문에서는 2장에서 초고속 전동기 구동시스템에 구현 및 제어방식에 대해서 논하고, 3장에서는 실험과형을 도시하고 마지막으로 4장에서는 이에 관한 결론을 내리고자 한다.

II. 본 론

2.1 PMSM 동기전동기 벡터 드라이버

벡터 드라이버에 사용된 초고속 전동기는 표면부착형 영구자석 동기전동기로 그 역기전력은 정현파이다. 벡터제어기법을 이용하여 전동기 제어를 구현하였으며, 공간벡터 PWM 기법을 이용하여 인버

터를 구성하였다. 동기전동기는 영구자석인 회전자 위치에 따라 최대토크를 발생하는 전류자속벡터의 위치가 변하게 된다. 하지만 이를 회전자인 영구자석의 관점에서 보면 항상 일정한 위치에 놓이게 된다. 회전자인 영구자석의 관점에서 볼 때 발생하는 토크는 식4와 같이 간단한 수식으로 표현이 가능하게 된다. 이를 위해서는 식1, 식2와 같은 좌표계 변환이 필요한데 3상 좌표계 전동기 전압방정식에서 고정자 2상 정지좌표계로 또 영구자석에 기준을 둔 2상 동기좌표계로 전동기 전압 방정식이 변환된다. 영구자석 동기전동기 동기좌표 dq 전압방정식은 식3과 같이 표현되어진다. 벡터제어는 자속축 전류와 토크축 전류를 분리하여 제어하게 되는데 그림1과 같이 자속축 전류를 영으로 하여 제어하면 이때 발생하는 토크는 식4와 같다.[5~6]

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

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

$T(0)$: 3상 정지좌표계 → 2상 정지좌표계

$R(\theta)$: 2상 정지좌표계 → 2상 동기좌표계

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

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

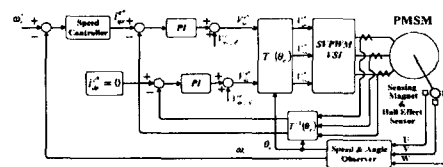


그림 1. 고속 영구자석 동기전동기 벡터제어기
Fig 1. Vector control for High speed PMSM motor

전류제어기는 벡터제어기법인 비간섭제어기로 구현되었는데, 그 구조는 그림 1과 같다. 이러한 벡터 제어기는 토크 발생전류인 토크축 전류(i_{qs}^*), 자속축 전류($i_{ds}^* = 0$)를 분리하여 각각을 독립제어할 수 있다는 특징을 지니고 있다. 전류제어기에서 식3

의 상호간섭부분과 비선형분을 전향보상기에서 식5, 식6과 같이 상쇄시켰다.

$$V_{ds-ff}^r = R_s i_{ds}^r - \omega_r L_s i_{qs}^r \quad (5)$$

$$V_{qs-ff}^r = R_s i_{qs}^r + \omega_r L_s i_{ds}^r + \omega_r \lambda_f \quad (6)$$

전향보상기의 결과로 식4의 전압방정식이 서로 독립적인 선형방정식이 된다. i_{qs}^r, i_{ds}^r 은 각각 별도의 PI 제어기로 구현되었다. 넓은 운전영역에서도 단일 제어기 GAIN을 사용하였는데 이는 전향보상기에서 식3의 전압방정식에서 비선형적인 부분을 상쇄시켰기 때문에 가능했다.

2.2 PMSM 동기전동기 센서리스 벡터 드라이버

그림 2는 직접 구동방식의 터보 압축기에 적용된 센서리스 벡터제어의 block diagram으로, 이의 기본 구조는 앞서 설명한 동기전동기 벡터제어의 구조 그림1과 동일하며 단지 홀센서를 대신하여 전동기 전압방정식을 이용하여 회전자의 각도정보 및 회전속도를 검출하는 전동기제어 알고리즘이 추가되었다.[5]

센서리스 벡터제어의 전향 보상기는 식7, 식8와 같이 설정하였다.

$$V_{ds-ff}^r = R_s i_{ds}^r - \omega_r^* L_s i_{qs}^r \quad (7)$$

$$V_{qs-ff}^r = R_s i_{qs}^r + \omega_r^* L_s i_{ds}^r + \omega_r^* \lambda_f \quad (8)$$

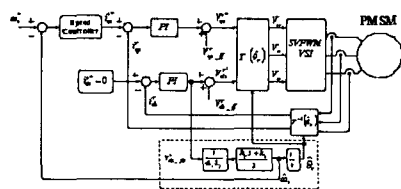


그림 2. 제안된 고속 영구자석 동기전동기 센서리스 벡터제어기

Fig 2. Vector control for High speed PMSM motor

전기적인 과도상태를 무시하면 영구자석 동기전동기의 추정된 좌표계에서의 전압방정식은 식9~11과 같다.

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r - \omega_r L_s i_{qs}^r + \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \quad (9)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \omega_r L_s i_{ds}^r + \omega_r \lambda_f \cos \theta_{err} \quad (10)$$

$$\theta_{err} = \theta_{est} - \theta_r \quad (11)$$

* i_{qs}^r, i_{ds}^r : 추정 동기 좌표계 dq 전류

* ω_r^* : 회전자의 추정 속도,

* θ_{est} : 추정 전기각, θ_r : 실제 전기각

회전자의 각도오차 θ_{err} 은 전동기 회전자의 실제 각도와 추정된 각도와의 차이이다. d축 PI 제어기에서 보상되는 보상전압은 식5와 식7의 오차인데, 전류제어기에서 전류제어가 심각한 오차 없이 실행되고 각도 오차가 작다면 그 보상전압은 식12와 같이 근사시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ds-ff}^r &\approx R_s (i_{ds}^r - i_{ds}^{r*}) - \omega_r L_s (i_{qs}^r - i_{qs}^{r*}) + \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \\ &\approx \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \\ &\approx \omega_r \lambda_f \theta_{err} \end{aligned} \quad (12)$$

그림 2에 제안된 센서리스 알고리즘을 실제에 적용하려면 전동기의 역기전력이 충분히 커야 가능하나 정지 시 및 저속에서는 전동기의 역기전력이 충분히 크지 못하므로 제안된 알고리즘의 적용에 어려움이 있었다. 이를 극복하기 위해서 시도된 방법이 초기 구동부터 저속영역 및 제안된 센서리스 알고리즘을 적용하기에 알맞은 속도까지는 일정 크기의 전류를 주어진 속도 패턴에 따라 회전시키는 것이었다. 이때 회전체 위치정보는 속도 지령정보를 적분하여 벡터제어의 인가하였다. 그림3과 같은 속도 PATTEN에 따라 일정 크기의 전류를 회전시키되 영역 3에서는 제안된 센서리스 알고리즘으로 그 모드를 전환시켰다.

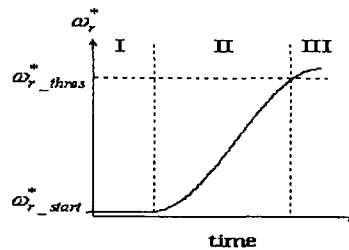


그림 3. 주어진 속도 패턴에 의해 일정전류를 인가할 경우

Fig 3. Frequency pattern for constant current control with pre-patterned speed

2.3 제안된 센서리스 구동상태에서의 동기전동기 파라메타 튜닝

정확한 전동기 파라메타 설정을 위해서 정격부하 및 정격회전속도에서 센서리스 운전 중 파라메타를 설정하였다.

2.3.1 전동기 인덕턴스 튜닝

전동기 인덕턴스가 실제 인덕턴스와 오차가 있을 시 해당 파라메타가 센서리스 알고리즘에 미치는 영향은 식13, 식14와 같다. 이는 식7과 식8에 오차를 지닌 인덕턴스를 대입하고 식9와 식10을 뺀 값이다.

$$\begin{aligned} \theta'_{err} &= \theta_{err} - (Ls i'_{ds} - Ls i''_{ds}) / \lambda_f \quad (13) \\ V'_{\alpha-\beta} &\approx \omega_r Ls i'_{ds} - \omega_r Ls i''_{ds} + \omega_r \lambda_f (\cos \theta_{err} - 1) \\ &\approx \omega_r Ls i'_{ds} + \omega_r \lambda_f (\cos \theta_{err} - 1) \quad (14) \end{aligned}$$

Ls : 전동기 인덕턴스, Ls' : 설정 인덕턴스

2.3.2 전동기 역기전력 튜닝

센서리스 운전을 위해서는 역기전력 정수가 가장 중요한 파라메타이다. 선행시험에서 오차를 줄이기 실험이 실시되었다. 정상상태에서 q축 PI 제어기에서 보상되는 보상전압은 식8과 식10의 오차인데, 전류제어기에서 전류제어가 심각한 오차 없이 실행되고 앞선 설정에서 전동기의 인덕턴스가 정확히 설정되었고, 각도 오차가 작은 상태에서 실제 전동기의 역기전력과 제어기의 역기전력이 차이가 있을 경우 그 보상전압 $V'_{\alpha-\beta}$ 은 식12와 같은 방법으로 식15와 같이 근사시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta''_{err} &= \lambda_f \theta_{err} / \lambda'_f = (\lambda_f / \lambda'_f) \theta_{err} \quad (15) \\ V'_{\alpha-\beta} &\approx \omega_r (\lambda_f \cos \theta - \lambda'_f) \\ &\approx \omega_r (\lambda_f - \lambda'_f) \end{aligned}$$

* λ_f : 역기전력상수, λ'_f : 설정 역기전력상수 식16에 근거하여 $V'_{\alpha-\beta}$ 의 절대값이 최소가 되는 역기전력을 전동기의 역기전력 상수로 설정하였다.

III. 실험파형 및 비교 검토

그림 4는 70,000rpm 무부하시 벡터제어기에서의 DC LINK 입력전류[CH1,1A/1mA]와 출력전류 파형 U상[CH2,40A/V],V상 [CH3,40A/V],W상[CH4,

40A/V]을 도시한 것이다. 상전류가 무부하시 부하 상태에 비해 현저하게 적음을 알 수 있다.(참조 그림 6) 이는 벡터제어방식을 도입하여 유효전류만 공급하고 자속축 전류를 최소화($i'_{ds}=0$ 하였기 때문이다.

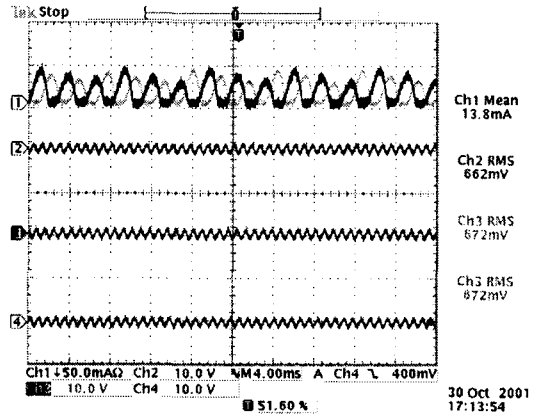


그림 4. 벡터 드라이버 Idc,U,V,W상 전류
Fig 4. Vector Driver Idc,U,V,W Phase Current

그림 5는 센서리스 초기 구동시 출력전류 파형을 전류센서[Tektronix A6042XL,AM503B]를 사용하여 U상[CH1,100A/10mV] 측정 한 것이다. 초기에 전류 PEAK값이 약 300A가 되도록 설정한 후에 이를 그림에서 보여주는 바와 같이 주어진 속도 PATTEN에 따라 가속하였음을 알 수 있다.

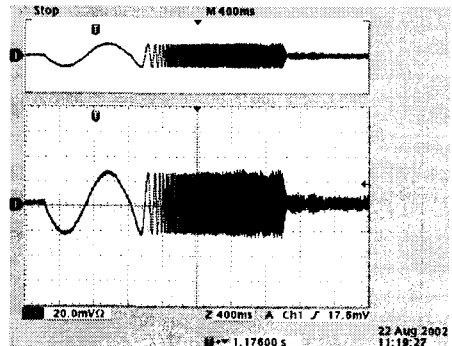


그림 5. 센서리스 초기 구동시 전류파형
Fig 5. Current waveforms proposed sensorless start

그림 6은 62,000rpm에서 100마력 출력시 센서리스 벡터 제어기에서의 i_{qs}^r [CH1,40A/V], U상 전류 [CH2,40A/V], 전류센서[Tektronix A6042XL,AM503B]를 사용하여 측정된 U상 전류[CH3, 200A/10mA] 및 회전자의 절대위치 정보[CH4]를 비교한 것이다.

i_{qs}^r 값과 U상전류 PEAK값이 일치하고 62000rpm의 출력 전류파형이 정현파를 유지하고 있는 것은 고속에서도 벡터제어가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

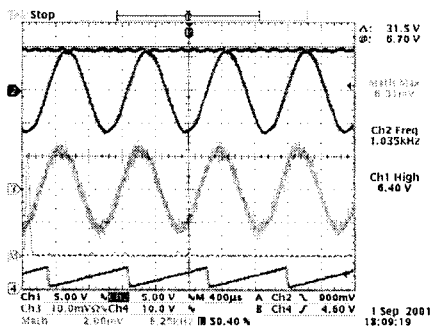


그림 6. 벡터 인버터 U상 전류파형
Fig 6. Vector drive U phase current

IV. 결론

국내, 외의 선행연구가 거의 전무한 상태에서 70,000rpm, 150마력 직접 구동방식 터보압축기를 구현하기 위하여 초고속 영구자석 동기전동기를 이용하여 구현하여 실험하였다. 초고속 영구자석 동기전동기의 벡터 제어방식을 고속기에 적용하여 70,000rpm, 150마력 전동기 구동시스템의 가능성을 도출하였고, 시스템 특성상 고속의 전동기 위치센서를 장착할 수 없어 센서리스 벡터제어기를 제안 및 구현하였다. 또한 센서리스 알고리즘의 정확도를 높이기 위하여 정격부하에서 전동기 파라메타 튜닝을 실시하였다. 강전 회로는 기존의 인버터 구조를 가지고 원하는 정도의 제어 특성을 얻을 수 있었다. 이는 고속 DSP를 이용한 디지털 제어기, 공간벡터 PWM 및 동기전동기 벡터제어기법의 우수성에서 기인한 결과로 파악된다. 이러한 연구를 근거로 70,000rpm,

150마력 직접 구동형 터보 압축기를 위한 초고속 대용량 영구자석형 동기전동기 구동시스템을 설계, 제작 할 수 있었으며, 이를 초소형 압축기 TME 150에 적용하였다.

참고문헌

- [1] Compressor Aerodynamics, na Cumpsty Longman Scientific & Technical 1989, pp.19-21.
- [2] A Super High Speed PM Motor Drive System by Quasi-current Source Inverter, I. Takabashi, T. Koganezawa, Guija Su, Kazunobu Oyama, IEEE ISA Vol 30, no 3, 1994.
- [3] High Speed Motor Driver for Industrial Applications, Movhoub Mekhiche, James L. Kirtley, Mary Tolikas, IEMD '99, pp.244-248, 1999.
- [4] 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.
- [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.
- [6] Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control schemes for PMSM in Super High Variable Speed Operation, Longya Xu, Chagjiang Wang, IEEE/ISA 1998.

Motor, J.R Hendershot, TJE Miller, Oxford

저자소개



권정혁(Jeong-hyeck Kwon)
영남대 전자공학과 공학사
창원대 전자공학과 공학석사
동대학원 박사과정수료
現 (주)삼성테크윈 파워시스템연구
소

※관심분야: 모터 드라이버&자동제어



변지섭(Ji-seob Byeon)
창원대 전자공학과 공학사
동대학원 공학사
現 (주)삼성테크윈 파워시스템연구
소

※관심분야: 모터드라이버&control



최중경(Jung-keying Choi)
고려대 전기공학과 공학사
고려대 전기공학과 석사
고려대 대학원 공학박사
現 창원대학교 전자공학과 교수
※관심분야: 서보기기, 자동동조제
어, μ p응용, 영상제어



류한성(Han-seong Ryu)
경상대 전자재료공학과 공학사
경상대 대학원 공학석사
창원대 대학원 전자공학과 박사수
료
※관심분야: 영상처리, 영상 하드웨
어시스템, 위성통신