論文2003-40SC-4-1

직접 구동방식 터보 압축기를 위한 통합 제어기 개발

(Development of An Integrated Controller for a Direct Drive Turbo Compressor)

權 正 赫 *, 卞 智 燮 *, 崔 重 暻 **

(Jeong-hyeck Kwon, Ji-seob Byeon, and Jung-keying Choi)

요 약

터보 압축기는 구조적으로 임펠러를 고속회전 시켜야한다. 범용전동기에 높은 기어비를 가진 기어박스를 이용하여 구현하였는데, 이는 관성 모멘트, 마찰손 및 압축기의 크기를 증가시켰다. 최근 터보 압축기의 연구는 초고속 동기전동기를 장착하고 있고 기어박스를 제거하여 크기와 마찰손을 최소화하는 방향으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 150마력 70,000rpm 직접 구동방식의 터보 압축기를 개발하기 위하여 초고속 동기전동기용 인버터제어기, 공압제어기 및 MMI 기능을 통합한 단일 DSP(Digital Signal Processor) 구조의 통합제어기를 구현하였다. 이는 하드웨어적인 부분만 아니라 소프트웨어적인 측면에서도 역시 통합 작업이 필요하였다. 러한 통합으로 하드웨어적으로는 제어 시스템이 간략화 되었으며, 소프트웨어적으로도 동일한 개발환경에서 각 제어기가 구현되고 통합되었다. 이를 개발 및 제작하여 150마력 70,000rpm 직접 구동방식의 터보 압축기에 적용하였다.

Abstract

Turbo compressors need high speed rotating impeller in structure, high rate gearbox and conventional induction motor. This mechanical system increased moment of inertia and mechanical friction loss. Recently turbo compressor has adopted a super high-speed motor and driver and have made its size smaller and mechanical friction loss at minimum. In this paper, variable super high-speed motor controller, compressor controller and MMI controller are implemented with only one DSP (TMS320VC33) chip for a 150HP, 70,000rpm direct drive turbo compressor. It was required hardware and software integration. The result of integration, Controller hardware became simple and all control software are developed same developing tool. The implements turbo compressor meets the requirements.

Keyword : compressor, turbo, pmsm, controller, dsp

Ⅰ. 서 론

터보압축기는 그 구조상 고압의 압축공기와 높은 공력효율을 필요로 하기때문에 임펠러의 고속회전을 필요로 한다. 직접구동방식의 터보압축기는 초고속 전동기와 이를 구동하는 인버터 시스템의 적용으로 고속회전을 구현하기 위한 증속용 기어박스를 제거할 수 있어 시스템이 간단 및 소형화되고, 인버터의 적용으로 부하에 적극적으로 대응하여 출력을 조절 할 수 있으

* 正會員, 三星테크윈 파워시스템硏究所 電氣電子Lab
(Samsung Techwin Power System R&D Center, Electric and Electronic Lab)
** 正會員, 昌原大學校 電子工學科 産業電子制御硏究室
(Changwon National University, Industrial Electronic Control Lab.)
接受日字:2002年9月3日, 수정완료일:2003年6月20日

므로 효율 또한 증가시킬 수 있다. 이러한 이유로 이와 유사한 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있다[1, 2].

이를 개발하기 위해서는 초고속 전동기 구동시스템 구현 기술, 이를 제어하기 위한 고속 구동용 인버터, 공압에 필요한 제어기 및 고속 회전용 임펠러 설계, 제작 기술이 필수적이다. 제어기 측면에서 보면 공압 제어기술과 고속구동용 인버터 제어기술이 주요 핵심기술 중의 하나이다.

본 논문에서는 Ⅱ장에서 공압 제어기를 구현하기 위한 개발 과정에서 실험으로 얻어진 터보 압축기의 공력 특성을 서술하였고, 이러한 데이터에 근거한 압축기와 전체 제어시스템의 모델링, 그리고 실제 구현에 대해서 논하고, Ⅲ장에서는 시뮬레이션 및 실험파형을 나타내었다. 마지막으로 Ⅳ장에서는 이에 관한 결론을 내리고자 한다.

Ⅱ. 본 론

직접 구동방식 70,000rpm, 150마력 터보 압축기의 전체 하드웨어 구성을 간략히 표현하면 <그림 1>과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 1단(그림의 좌측 임펠러)에서 흡입된 공기는 1단 임펠러를 통과하면서 압축된 뒤 냉각기를 통하여 냉각되고, 2단 임펠러(그림의 우측)로 흡입된 공기는 다시 압축되어 원하는 압력을 생성하게 된다. 이렇게 압축된 공기는 시스템에 공급되기 전 다시 한번 냉각을 하게되는데 이는 압축된 공기를 사용자 측면에서 적절한 온도로 낮추어 주기 위함이다. 이렇게 생성된 공기는 일정한 압력, 유량이 유지되어야 하므로 공급되기 직전 BOV(Blow Off Valve - 토출 밸브) 밸브를 지나게 된다. 본 장에서는 실험을 통해 확보된 압축기의 특성과 이를 이용한 압축기의 모델링, 제어기 구현 및 초고속 전동기 구동 시스템에 관하여 언급 하고자 한다.

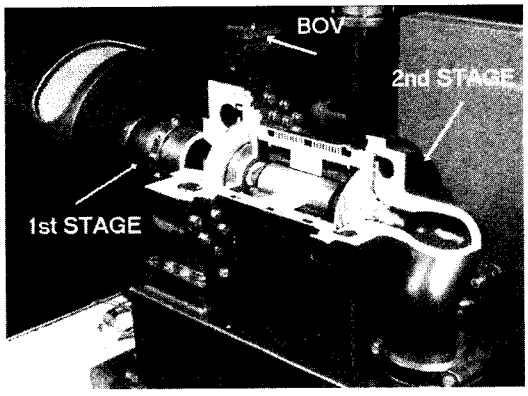


그림 1. 직접구동방식 터보 압축기 구성도
Fig. 1. Direct drive turbo compressor.

1. 압축기 특성표 및 모델링

압축기 구성품 시험을 통하여 <그림 2>와 같은 압축기 특성표를 획득 할 수 있었다. 이렇게 획득압축기 특성표는 <그림 2>에서 보는 바와 같이 압축기의 회전속도, 압력 및 유량에 따라 동작점이 달라지고 그 상황에 따른 필요 출력이 달라지게 됨을 알 수 있다. 주어진 압축기의 특성표를 이용하여 시뮬레이션에서 사용가능한 모델을 도출하였다.

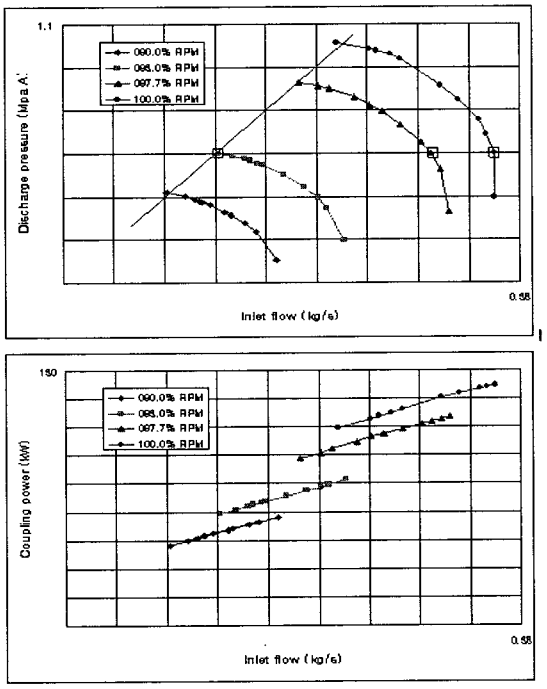


그림 2. MC 150 압축기 특성곡선
Fig. 2. MC 150 Compressor performance map.

실제 상황과 가장 유사한 시뮬레이션을 위해서는 각 변수의 보정이 필요한데, 일반적으로 압축기의 특성표는 해수면에서의 대기조건 1기압 상온 35도를 기준으로 한다. 따라서, 모델링 작업의 첫 단계는 실제 입구 온도와 압력 조건을 고려한 보정된 속도와 유량 값을 구하는 것이다. 아래의 식 (1)과 식 (2)을 이용하여 속도와 유량을 보정하였다[3].

$$N_{cor} = \frac{N_{Real}}{\sqrt{T_{Inlet} / 308.15}} \quad (1)$$

$$Q_{cor} = Q\frac{\sqrt{T_{Inlet} / 308.15}}{P_{Inlet} / 1.033} \quad (2)$$

두 번째 단계는 이 보정된 값에 의해서 해당 압축기의 특성치들, 즉 기계적인 출력, 압축비 및 유량를 선정하는 것이다. 압축기의 회전 속도와 토출 유량이 주어지면 미리 작성된 해당 압축기의 특성표를 이용하여 압축기에 필요한 파워를 출력하는 모델로 설정하였다. 산업용 터보 압축기의 용도는 사용자 측에 일정한 압력의 압축 공기를 공급하는 것이 목적임으로 사용자 측에서 필요로 하는 압력은 일정하지만 각 시간별 혹은 상황별로 사용하는 유량이 변화하므로 해당 압축기의 토출 압력과 파워가 달라진다고 가정하였다.

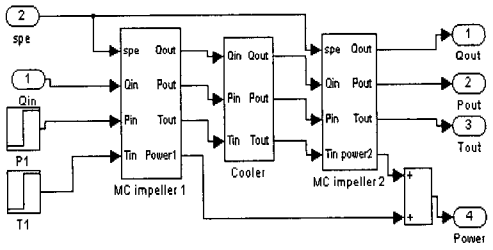


그림 3. MC 150 압축기 모델링
Fig. 3. MC 150 Turbo compressor modeling.

이는 Matlab의 Simulink 환경 하에서 모델링 되었으며 실험에 의한 획득된 터보압축기 Map은 Simulink상의 S Function을 이용하여 구현하였다. S Function은 시험 데이터가 주어졌을 시 이를 이용하여 모델링 할 수 있는 유용한 기능이다[4].

2. 공압 제어기 구현 및 모델링

산업용 설비로서의 압축기는 사용자측의 유량 변화에 관계없이 일정한 압력의 압축 공기를 사용자에게 공급하는 것이다. 이를 위해서 두 가지 제어 모드가 구현되었다.

첫째 : SPEED 제어 모드
둘째 : BOV 제어 모드

<그림 4>에서 보는 바와 같이 사용유량이 Q1인 상황에서 압축기가 93%rpm(70,000rpm 100% 기준)으로 회전하고 있다면 압축기의 동작점은 A로 사용자가 필요로 하는 압력 Pset을 공급 할 수가 있다. 사용자의 사용 유량이 Q1에서 Q2로 증가되었을 때 압축기의 회전속도를 93%rpm으로 그대로 유지하면 압축기의 동작점은 B로 이동하게 되고 사용자측에 공급되는 압력은 Pset에서 P2로 떨어지게 된다. 이를 방지하기 위해서는 회전 속도를 증가시킬 필요가 있는데 압축기의 회전속도를 94.8%rpm으로 증가시키면 압축기의 동작점은 C로 이동하게 되고 이 경우의 공급압력은 Pset이 된다. 이와 같이 사용자의 유량변화에 따른 압력변화를 압축기의 회전속도를 가변하여 일정한 압력으로 유지시켜 주는 것이 속도제어모드이다[5].

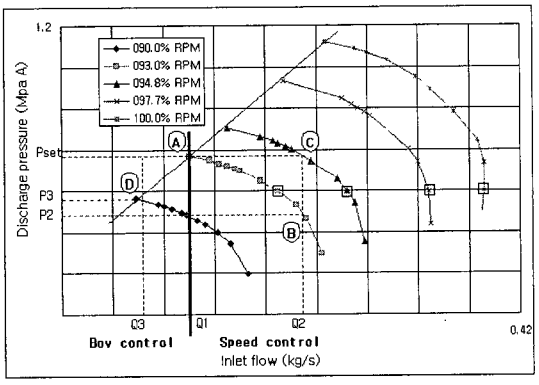


그림 4. 압축기 제어 방식
Fig. 4. Compressor control method.

압축기가 동작점 A에서 가동되고 있을 때 사용자의 유량이 Q1에서 Q3로 감소되었고 93%rpm을 그대로 유지하고 있다면 압축기의 특성표에 데이터가 없는 불안전영역으로 들어가게 된다. 이를 막기 위해 압축기의 회전속도를 90%rpm으로 떨어뜨리면 압축기의 동작점이 D로 이동하고 출구압력이 P3로 떨어져서 사용자가 원하는 압력 Pset을 형성 할 수 없게 된다. 이 경우 제어모드를 BOV 제어모드로 전환한다. BOV는 압축기의 사용자 측과 병렬로 연결되어 있는데 사용자 측의 유량이 Q3라면 사용자가 필요로 하는 압력인 Pset을 발생하기 위한 압축기의 최소 회전속도인 93%rpm을 그대로 유지하면서 압축기가 안전하게 운영되기 위한 유량인 Q1을 확보하기 위해 BOV 밸브를 통하여 압축된 공기를 △Q(Q1-Q3)를 대기중에 버림으로써 압축기의 동작점을 A로 설정하여 사용자에게 필요로 하는 압축

공기를 공급하는 방식이다. <그림 5>는 SPEED 제어 모드의 제어기 구성과 모델링이다. SPEED 모드에서는 앞서 설명한 대로 BOV는 완전히 닫힌 상태에서 압력을 제어한다. 공압 제어기는 사용자 설정 압력과 실제 압력을 비교하여 제어출력인 압축기의 지령속도를 결정하게 된다. 이때 사용된 제어기는 디지털 PI 제어기이다. 그 다음은 압축기의 실제 회전속도와 공압 제어기에서 주어진 지령 속도를 비교하여 출력 전류를 제어하게 된다. 여기에는 실제 인버터 시스템에서 출력 가능한 전류가 제한되어 있으므로 그 한계치를 제한하였다. 전류제어기 부분은 영구자석형 동기전동기를 사용하였으므로 벡터제어로 구현되었으나 DC 전동기에 근거하여 간략히 모델링 하였다. 이는 전동기 제어주기(30kHz)와 응답성이 공압 제어기 제어주기(40Hz)에 비해 월등히 빠르기 때문에 <그림 5>와 같이 간략화 하였다. 회전체 방정식은 식 (3)과 같다.

$$J\frac{dw}{dt} + Bw + T_L = T_e \qquad (3)$$

여기서 부하는 압축기의 출력이 되며, 앞서 모델링된 압축기 모델에서 회전속도와 사용 유량이 결정되면 토출 압력과 필요한 파워를 계산하여 산출된다. 이때 계산된 토출 압력은 제어기의 실제 압력으로 주어지게 되고 필요한 파워는 회전력으로 계산되어 운전 속도에서 부하토크로 나타난다.

압축기 제어 프로그램은 <그림 6>에서 보는바와 같이 서로 다른 7개의 상태로 구분된다. 속도 제어 모드 및 BOV 제어 모드는 LOAD(부하모드) 상태에서 구현

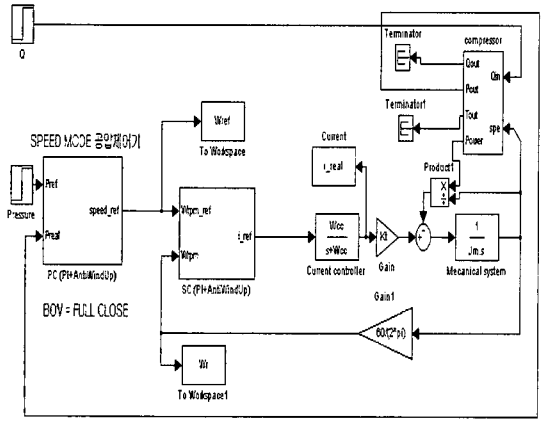


그림 5. 속도 모드 공압제어기 모델링
Fig. 5. Speed control mode system modeling.

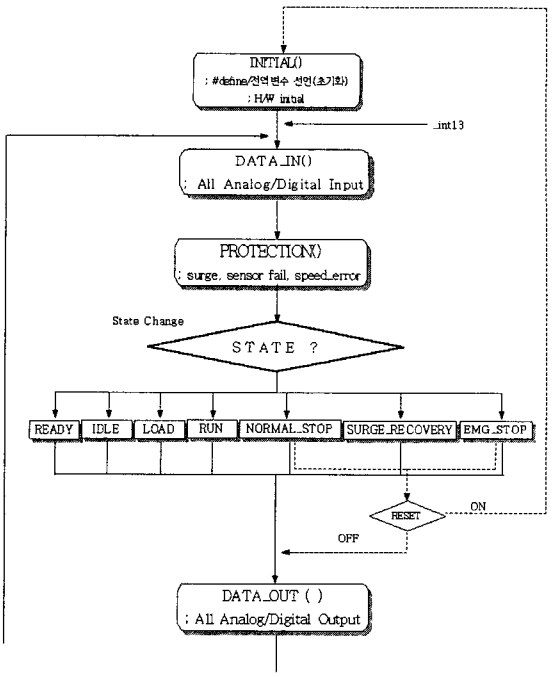


그림 6. 공압제어기 순서도
Fig. 6. Compressor control flow chart.

되었으며, 그 밖의 상태들은 비상정지, 정상정지, 압축기 서지발생, 복귀 및 압축기 구동을 위한 시작 조건 확인이다.

3. 초고속 전동기용 센서리스 벡터제어기 구현

초고속 구동 시스템은 표면부착형 영구자석 동기전동기로 그 역기전력은 정현파이다. 이 제어기는 벡터제어기법을 이용하여 전동기의 제어기를 구현하였으며, 공간벡터 PWM(Pulse Width Modulation) 기법을 이용하여 인버터를 구성하였다. 동기전동기는 영구자석인 회전자의 위치에 따라 최대토크를 발생하는 전류자속 벡터의 위치가 변하게 된다. 하지만 이를 회전자인 영구자석의 관점에서 보면 항상 일정한 위치에 놓이게 된다. 회전자인 영구자석의 관점에서 볼 때 발생하는 토크는 식 (6)과 같이 간단한 수식으로 표현이 가능하게 된다. 이를 위해서는 좌표계 변환이 필요한데 식 (4)와 같은 고정자 3상 좌표계에서 고정자 2상 정지좌표계로 또 영구자석에 기준을 둔 2상 동기좌표계로의 변환이 필요하다. 이 변환의 결과로 영구자석 동기전동기 동기좌표 dq 전압방정식은 식 (5)와 같이 표현되어진다. 벡터제어는 자속측 전류와 토크측 전류를 분리하여 제어하게 되는데 <그림 5>와 같이 자속 측 전류를 영으로 하여 제어하면 이때 발생하는 토크는 식 (6)과 같

다[6, 7].

$$T(0)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}}\end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R(\theta)=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix} \quad (5)$$

$T(0)$: 3상 정지좌표계 -> 2상 정지좌표계

$R(\theta)$: 2상 정기좌표계 -> 2상 동기좌표계

$$\begin{bmatrix}V^r_{ds}\\ V^r_{qs}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Rs+pLs & -\omega\times Ls\\ \omega\times Ls & Rs+pLs\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i^r_{ds}\\ i^r_{qs}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \omega\times\lambda_f\end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T=\frac{3}{2}\times\frac{P}{2}\times\lambda_f\times i^r_{qs} \quad (7)$$

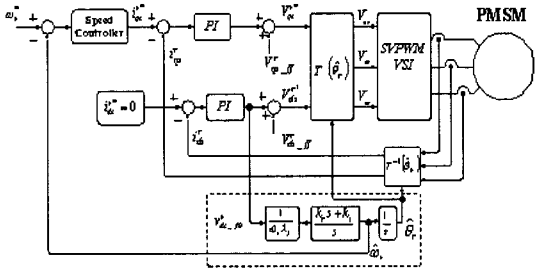


그림 7. 제안된 초고속 영구자석 동기전동기 센서리스 벡터제어기

Fig. 7. Proposed sensorless vector control for super high speed motor.

<그림 7>은 직접 구동방식의 터보 압축기에 적용된 센서리스 벡터제어기의 구성도(Block Diagram)로, 동기전동기 벡터제어 방식에 비간섭제어기와 위치센서없이 회전체의 절대위치를 감지하는 센서리스방식을 적용하였다. 벡터제어기는 토크 발생전류인 토크측 전류(i^r_{qs}), 자속측 전류($i^r_{ds}=0$)를 분리하여 각각을 독립제어 할 수 있다는 특징을 지니고 있다. 비간섭 제어기는 벡터제어기의 전향 보상기에 식 (8), 식 (9)와 같이 상호 간섭분과 비선형 요소를 상쇄하여 서로 독립적인 제어가 가능하게 하였다. 다만, 센서리스 제어기의 도입으로 식 (8), 식 (9)에서 보는바와 같이 dq측 전류와 회전속도가 실측값이 아닌 센서리스 알고리즘에 의해 추정된 값이 사용된다는 것이 기존의 비간섭 제어기와 구분되는 사항이다. 센서리스 방식은 기본 구조는 동기 전동기 벡터 제어기의 구조와 동일하며 단지 위치센서를 대신하여 전동기 전압방정식을 이용 회전자의 각도정보 및 회전속도를 검출하는 전동기 제어 알고리즘이 추가된 점이 기존의 동기전동기 벡터제어 방식과 다르다. 벡터제어기의 전향 보상기는 식 (8), 식 (9)와 같이 설정하였다[7].

$$V^r_{ds-ff}=R_s i^{r*}_{ds}-w^*_r Ls i^{r*}_{qs} \quad (8)$$

$$V^r_{qs-ff}=R_s i^{r*}_{qs}+w^*_r Ls i^{r*}_{ds}+w^*_r\lambda_f \quad (9)$$

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

* w^*_r: 회전자의 추정 속도,

전기적인 과도상태를 무시하면 영구자석 동기전동기의 추정된 좌표계에서의 전압방정식은 식 (10), 식 (11)과 같다.

$$V^r_{ds}=R_s i^r_{ds}-w_r Ls i^r_{qs}+w_r\lambda_f\sin\theta_{err} \quad (10)$$

$$V^r_{qs}=R_s i^r_{qs}+w_r Ls i^r_{ds}+w_r\lambda_f\cos\theta_{err} \quad (11)$$

$$\theta_{err}=\theta_{est}-\theta_r \quad (12)$$

* θ_{est} : 추정 전기각, θ_r : 실제 전기각

회전자의 각도오차 θ_{err}은 전동기 회전자의 실제 각도와 추정된 각도와의 차이다. 정상상태에서 d축 PI 제어기에서 보상되는 보상전압은 식 (10)과 식 (8)의 차인데, 전류제어기에서 전류제어가 심각한 오차 없이 실행되고 각도 오차가 작다면 그 보상전압은 식 (13)과 같이 근사 시킬 수 있다.

$$\begin{aligned}V^r_{ds_fb}&\approx R_s(i^r_{ds}-i^{r*}_{ds})-\omega_r L_s(i^r_{qs}-i^{r*}_{qs})+\omega_r\lambda_f\sin\theta_{err}\\ &\approx\omega_r\lambda_f\sin\theta_{err}\\ &\approx\omega_r\lambda_f\theta_{err}\end{aligned} \quad (13)$$

<그림 7>에서 보는 바와 같이 위의 식 (13)에 의해 계산된 위치 오차값을 PI 제어기에 인가하여 회전자의 회전속도를 추출해내고 이를 다시 적분하여 회전자의 각도를 추정한다. 즉, 전동기 회전자의 각도오차 θ_{err} 가 0 보다 큰 경우 추정 전기각이 실제 전기각 보다 앞서 있으므로 추정 속도를 감소 시켜주면 θ_{err}가 줄어들고, 반대로 θ_{err} 가 0 보다 작은 경우 추정 전기각이 실제 전기각 보다 지연되므로 추정 회전속도를 증가시켜서 θ_{err}가 줄어들게 PI 제어기로 구현하였다. 이 과정에서 추정되어지는 추정 회전속도를 속도제어기의 회전자 실제 회전속도로 사용하였다. <그림 8>에 제안된 센서

리스 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 벡터제어기에 인가하였다. <그림 9>와 같은 패턴(Pattern)에 따라 일정 크기의 전류를 회전시키고, 영역 3에서는 제안된 센서리스 알고리즘으로 그 모드를 전환시켰다.

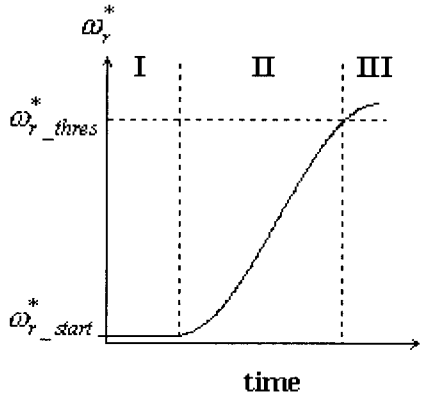


그림 8. 주어진 속도 패턴에 의해 정전류를 인가할 경우
Fig. 8. Frequency pattern for constant current control with pre-patterned speed.

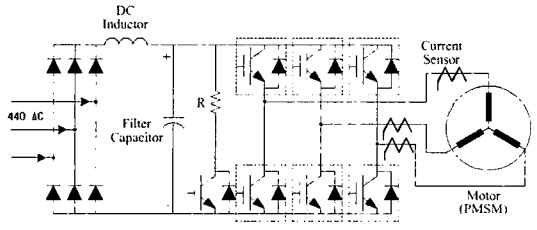


그림 9. 동기전동기 벡터제어기 강전회로
Fig. 9. Vector driver power circuit.

초소형 압축기는 팬(Fan)부하로 저속에서는 부하가 거의 걸리지 않으므로 주어진 알고리즘으로 초기 구동이 실시되었으며, 이후에는 제안된 센서리스 알고리즘으로 모드 전환하여 구동되었다. 전류제어기에서 생성된 동기좌표계 전압지령 V^r_{qs}, V^r_{ds}는 회전자의 절대위치 정보를 이용한다. 또한 공간벡터 PWM 기법으로 전동기의 고정자 인가되어야하는 V^s_{qs}, V^s_{qs} 를 생성하는데 이는 실제 전동기에 인가되는 상전압 Va, Vb, Vc 를 생성하게 된다.

영구자석형 동기전동기는 고속회전에 적합하도록 SmCo의 원통 자석을 Can으로 덮어씌운 구조를 하고 있으며 이는 기구적으로 안정적이었으며, 인버터 또한 센서리스 알고리즘의 적용으로 회전체 절대위치 센서를 장착하지 않아도 되어 이를 초소형 압축기 시스템에 적용하였다. 직접구동방식의 압축기의 경우 2단 압축기로 전동기 양쪽 축에 임펠러를 모두 장착하여 기구적으로 위치센서 장착할 공간이 없었기 때문이다. 초고속 전동기의 실제 적용에서는 높은 PWM 주파수와 적은 인덕턴스로 인해 PWM 주파수대의 전류 리플이 발생하였으며 이로 인해 회전체의 온도가 많이 올라가는 현상이 발생하였다. 이를 개선하기 위해 리쯔 전선을 이용하여 25uH의 공심 인덕터를 구현하였으며, 이를 인버터와 초고속 전동기 사이에 장착하여 전류 리플을 감쇠시키고 회전체 온도를 떨어뜨리는 효과를 거두었다.

4. 통합 제어기 구현

각 구성품 개발 후 제품 개발 시 사용자를 위한 인터페이스 및 각 제어기간의 통합작업이 필요하였다. 이는 하드웨어 뿐 만 아니라 소프트웨어적인 측면에서도 통합작업이 필요하였다. 개발의 용이성과 소프트웨어 개발환경의 통일을 위하여 이들 모든 기능이 하나의 DSP(Digital Signal Processor)에 의해 동작되는 통합 콘트롤보드를 개발하였다. 각 제어기는 하드웨어적인 측면에서는 DSP 및 제어기의 주요 기능(RAM, ROM, AD, DA)는 공유하고 하부 I/O 모든 인터페이스는 EPLD (Erasable Programmable Logic Device)로 구현함으로써 디지털 인터페이스를 간략화하고 각각의 전용 기능별로 분리되었다. 그림 10에서 보는 바와 같이 통합콘트롤 보드에는 모든 제어기에 공통적으로 사용된 디지털 I/O와 인버터 기능을 위한 전류, 전압 센서 인터페이싱, PWM 발생부 및 공압제어를 위한 압력, 온도, 진동 센서 인터페이스, 아날로그 입출력, MMI (Man Machine Interface)와 원격모니터링을 위한 시리얼통신 기능이 탑재되었다.

소프트웨어적인 측면에서는 고속 DSP(TMS320VC33, 75MIPS)의 적용으로 시분할하여 초고속 전동기의 전류제어 및 센서리스 알고리즘, 속도제어, 공압제어, MMI

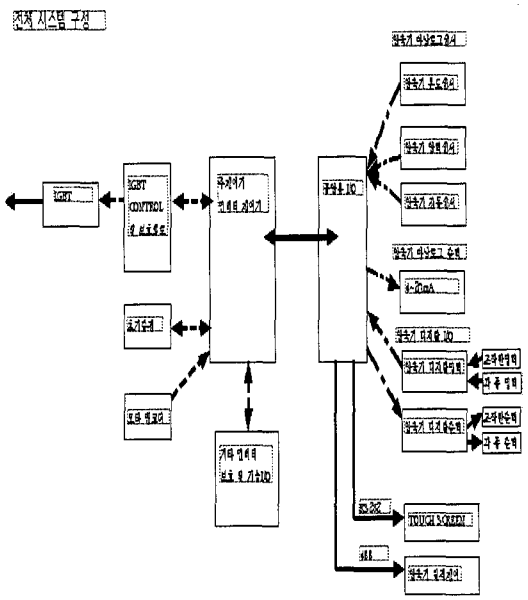
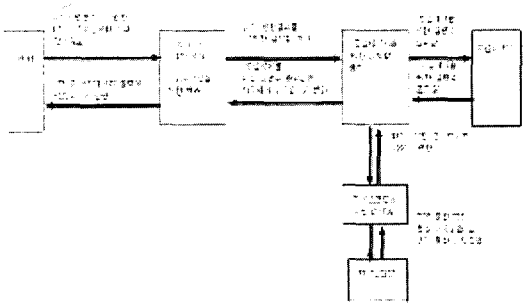


그림 10. 통합콘트롤 보드 하드웨어 구성
Fig. 10. Control board configulation.



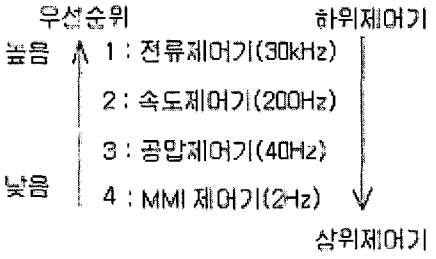


그림 11. 제어 프로그램 구조 및 우선순위
Fig. 11. Control program structure.

및 원격모니터링을 구현하였다. 프로그램의 우선순위와 각 제어기간의 인터페이스는 <그림 11>과 같다. 이는 실제 적용에서 많은 이익을 가져다 주었는데, 첫째는 하드웨어의 간략화와 원가절감이다.

초기 개발 시 공압 제어기를 PLC(Programmable Logic Controller)를 이용하여 구현하고 초고속 전동기의 인버터 제어기와 디지털I/O 및 아날로그 I/O로 인터페이스를 구현하고자 하였다. 이 경우 각각의 I/O와 이를 위한 배선 작업이 필요하나 통합제어기의 경우 고속 DSP의 적용으로 단지 인버터 제어기에 I/O 기능을 추가하여 서로간의 인터페이스를 위한 배선작업과 I/O 비용을 절감 할 수 있었다. 두 번째는 성능향상이다. 직접구동방식 터보압축기의 경우 전동기의 회전속도를 20,000~70,000rpm까지 운영하게 되는데 공압제어

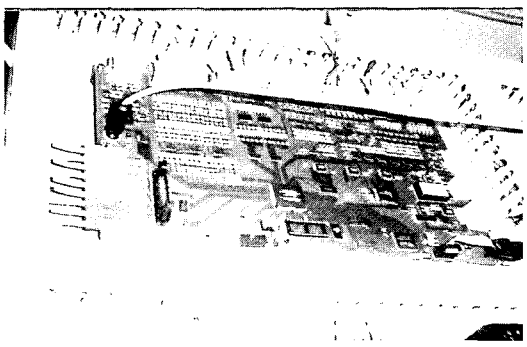


그림 12. 통합콘트롤 보드
Fig. 12. Control Board for Multi-Control.

기에서 주어진 속도 지령을 아날로그 값으로 인버터 제어기에 주어질 경우 A/D, D/A과정 및 선을 타고 들어오는 노이즈를 고려하면 그 분해능이 저하될 수밖에 없다.

그러나 통합 콘트롤보드의 경우 단일보드에서 할당된 메모리에서 해당 지령을 읽어오면 되므로 그 분해능은 전자와 비교가 되지 않는다. 또한 동일한 이유로 상, 하위 제어기에서 비교적 자유롭게 필요 데이터를 모두 사용할 수 있어서 각 제어기의 완성도를 높일 수 있었다. 화면 표시장치는 사용자의 편이성을 극대화하고 단일 DSP의 부담을 줄이기 위해 터치스크린을 사용하였다. 시리얼 통신을 통해 주어진 프로토콜에 맞추어 각 종 제어기 데이터전송, 데이터입력, 고장이력관리 기능 및 특수조작 기능을 구현하였다. 또한 485 시리얼 통신을 통하여 원격지에서도 운전상황을 PC로 모니터링 할 수 있도록 구현하였다.

Ⅲ. 시험결과

시뮬레이션 프로그램을 이용하여 압축기 작동환경

변화에 따른 제어 성능 및 다양한 조건하에서 시뮬레이션이 수행되었는데, <그림 13>은 공압제어기의 고정

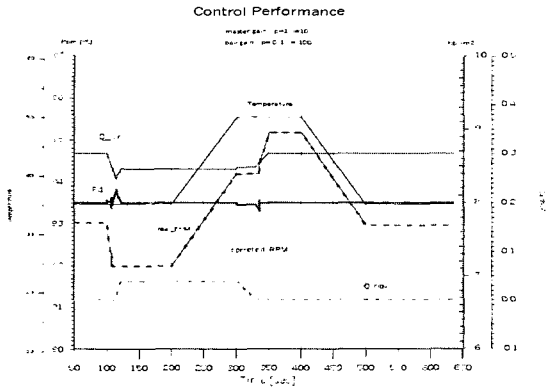


그림 13. 시뮬레이션 결과
Fig. 13. Simulation result.

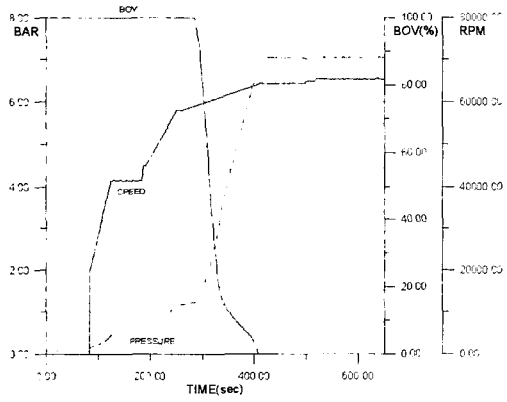


그림 14. 압축기 SPEED 모드 모니터링 데이터
Fig. 14. Compressor speed mode monitoring data.

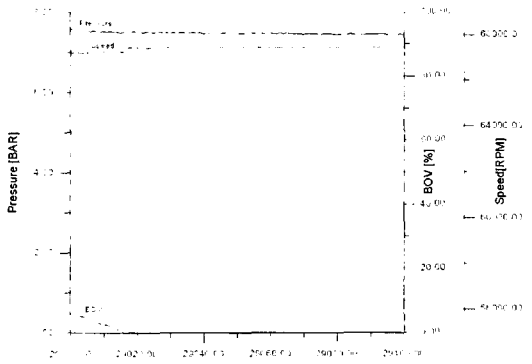


그림 15. 7.6 bar 설정 압축기 SPEED 모드 제어
Fig. 15. 7.6 bar setting speed mode control.

Gain에서 입구 온도 변화(35.15 ~ 50 deg)에 대한 제어 로직 운영 패턴을 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 200초에서 300초 사이에서는 흡입공기의 온도증가로 보정속도는 일정하게 유지되는 반면 압축기의 실제 속도는 증가하는 경향을 확인 할 수 있다.

<그림 14~17>은 압축기 현장 설치 후 기동 시 MMI를 통하여 획득된 DATA를 도식하였다. <그림 14>는 압축기 기동 후 400초 이후에 BOV 밸브는 완전히 닫히고 압축기의 회전속도를 제어하여 출구 압력을 7.0bar로 일정하게 제어하고 있다. <그림 15>는 출구 압력을 7.6bar로 설정하고 운전하는 경우 BOV 모드에서 SPEED 모드로 전환되어 토출압력을 제어하고 있다.

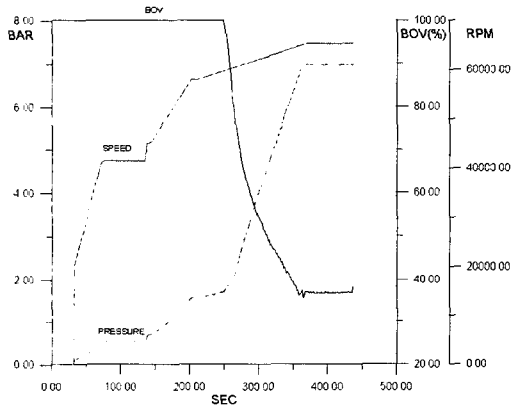


그림 16. 압축기 BOV 모드 모니터링 data
Fig. 16. Compressor BOV mode monitoring data.

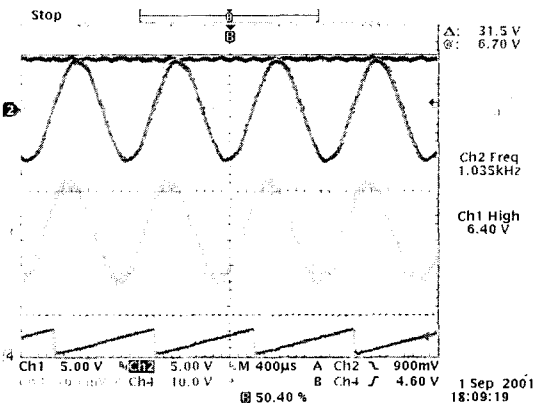


그림 17. 벡터 드라이버 Iqse, U상 전류
Fig. 17. Vector drive U phase current.

<그림 16>은 압축기 기동 후 BOV 모드로 제어되고

있는 경우로 350초 이후에 압축기의 회전속도를 일정하게 유지하면서 BOV 밸브의 열고 닫힘을 조절하여 출구 압력을 7.0bar로 일정하게 제어하고 있다.

<그림 17>은 62,000rpm에서 100마력 출력시 제어기에서의 iqse[CH1,40A/V], U상전류[CH2,40A/V], 전류센서[Tektronix A6042XL, AM503B]를 사용하여 측정한 U상 전류[CH3,200A/10mA] 및 센서리스 알고리즘으로 추정한 회전자의 절대위치 정보[CH4]를 비교한 것이다. iqse값과 상전류 첨두(Peak)값이 일치하는 것을 보면 고속 부하의 경우에도 벡터제어가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 벡터제어 인버터는 그 제어기 구성이 복잡하나 디지털 제어기를 도입하여 이들 대부분이 S/W로 구현되어지고, 공간벡터 PWM 등은 EPLD로 구현되었다.

Ⅳ. 결 론

세계 최초로 직접구동방식의 70,000rpm, 150마력 터보압축기 제어시스템을 구현하기 위하여 하드웨어적으로는 인버터 제어기와 공압 제어기능을 통합한 통합콘트롤 보드 및 고속 전동기용 인버터를 개발하였고, 소프트웨어적으로는 초고속전동기용 센서리스 벡터제어기, 2중 모드의 공압제어기 및 MMI 제어기를 시분할 법을 이용하여 단일 DSP하에서 구현하였다. 최근에 개발된 고속연산용 DSP인 TMS320VC33와 EPLD의 도입으로 이러한 통합작업이 가능하였다. 또한 개발 및 시험에 앞서 제어기의 응답성과 하드웨어 설계의 타당성을 확인하고자 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링

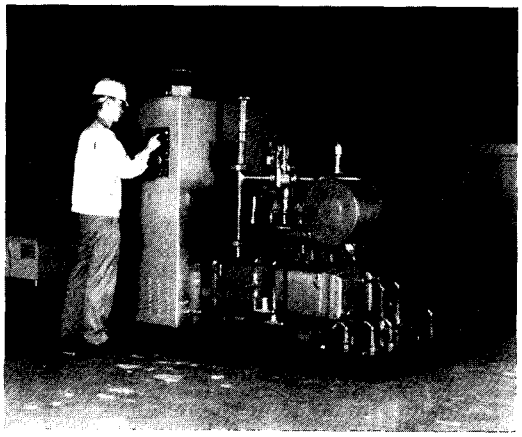


사진 1. TME 150 터보압축기
Pic. 1. TME 150 turbo compressor.

표 1. 전동기 및 인버터 사양
Table 1. Motor and inverter specification.

	전동기형식		제어기형식
역기전력형태	정형파	제어방식	벡터제어
상저항	0.048Ω	정격전류	240Arms
상인덕턴스	28uH	정격출력주파수	1200Hz
상역기전력 Vp-p	4.14V/krpm	PWM 주파수	15000Hz
정격 회전속도	70,000rpm	적용 CPU	TMS320VC33

하였다. 이러한 연구의 결과로 개발된 제어기를 직접구동방식 70,000rpm, 150마력 터보압축기에 적용할 수 있었다. 첨부된 사진 1은 실제 제작된 제품의 사진이며 <표 1>은 본 제품에 적용된 초고속 전동기와 인버터의 상세 사양이다. 추후 과제로는 공압제어기 모델링시 BOV의 히스테리시스 및 응답 지연에 관한 조사가 이루어져야 하겠으며, 압축기 시스템의 과도상태 모델링 등 압축기 모델링에 더 많은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] Movhoub Mekhiche, James L. Kirtley, Mary Tolikas, "High Speed Motor Driver for Industrial Applications," IEMD '99, pp. 244~248, 1999.

[2] Wen L. Soong, Gerald B. Kliman, Roger N. Johnson, Raymond A. White, Joseph E. Miller, "Novel High Speed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor," IEEE ISA, vol. 36, 2000.

[3] A. Whitfield, N.C. Baines, Design of radial Turbomachines, Longman, 31p, 1990.

[4] Using Simulink, MathWorks.

[5] Ralph L. Moore, "Control of Centrifugal Compressors," Instrument Society of American, Unit 5, 1989.

[6] Longya Xu, Chagjiang Wang, "Implementation and Experimental Investgation of Sensorless Control Schemes for PMSM in Super High Variable Speed Operation," IEEE ISA, 1998.

[7] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong-Hyeck Kwon, Jong-Sub Shin, "Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High Speed PMSM of Turbo-Compressor," IEEE ISA, Chicago Annual Meeting, 2001.

저 자 소 개

權 正 赫(正會員) 第40卷 SC編 第1號 參照

崔 重 暻(正會員) 第40卷 SC編 第1號 參照

卞 智 燮(正會員) 第40卷 SC編 第1號 參照