

# 유도형 리니어모터 성능의 온·라인 모니터링을 위한 가상계측시스템 구현

論 文
50B-5-1

## Realization of a Virtual Instrumentation System for On-Line LIM Performance Monitoring

張錫明\* · 李成浩\*\* · 張建宇\*\*\* · 鄭相燮§

(Seok-Myeong Jang · Sung-Ho Lee · Kun-Woo Chang · Sang-Sub Jeong)

**Abstract** - This paper presents a virtual instrumentation(VI) system for LIMs performance on-line monitoring. The VI is designed using the graphical programming language LabVIEW and is capable of performing on-line measurement functions, including data acquisition, display, and analyses in the time and frequency domains, as well as data archiving. To monitor in real time the steady-state and transient electromagnetic thrust of LIMs, the search coil is used for the determination of the flux linkage components, which is then multiplied by the appropriate current components to yield a signal proportional to the electromagnetic thrust. This paper reports the LIM's dynamics measured by the proposed on-line monitoring system.

**Key Words** : Virtual instrumentation system, On-Line monitoring, LabVIEW, Search coil, Electromagnetic thrust

### 1. 서 론

X자동화 시스템의 핵심 구동요소인 모터의 성능 모니터링 및 진단 시스템은 전체 시스템의 운전성능 및 제어상태를 파악하고 진단하는 매우 중요한 역할을 한다. 특히 이러한 시스템은 모터 파라미터의 추정, 성능 모니터링, 진동, 소음 모니터링 및 모터의 베어링, 고정자 권선, 회전자 바와 단락환, 축 또는 커플링 등에 관한 현재 상태에 관한 실시간 진단 등에 폭넓게 적용되고 있으며, 국내외적으로 이 분야에 대한 연구가 급속한 속도로 진행되고 있다[1]~[4].

즉 이러한 시스템은 주로 회전형 기기의 모니터링 및 진단에 적용되어 90년대 이후 Nejjari, Thorsen, Gao 등 많은 연구자들에 의한 연구결과들이 발표되고 있다[1][3][4]. 그런데 회전형 기기에 적용되는 기존의 방법들이 적용되기 어려운, 리니어모터로 구동되는 시스템, 즉 자기부상열차, 경전철 등은 물론 서보시스템의, 핵심요소인 리니어모터의 성능 모니터링 시스템 구축에 의해 성능 분석 자료를, 설계 및 해석 결과와 비교·검토하여 설계개선 및 정밀특성해석에 재반영하는 방법은, 시스템의 운전 및 제어성능의 향상 과정에 필수적인 조건이 되고 있다.

그러나 이러한 시스템은 하드웨어 및 소프트웨어 기술이 필수적으로 뒷받침되어야만 하며, 데이터 획득, 처리, 저장 및 디스플레이를 위한 프로그래밍을 위해 많은 시간을 소비

하여야만 한다.

그런데 기존의 모터 성능 모니터링 법은 센서나 측정기에서 읽어들이는 데이터를 GPIB 인터페이스를 통해 PC에서 수집하여 처리 및 디스플레이를 하는 과정으로 오프·라인으로 이루어졌다. 즉 전기량은 전력분석기 등에 의하여, 기계량은 시그널 레코더와 같은 별도의 고가 측정 장비를 통해 측정을 하고, 이로부터 획득한 데이터를 소프트웨어적으로 처리 및 분석하였다. 또한 DSP나 다른 프로세서를 이용해서도 실시간 모니터링 시스템의 구현을 할 수 있는데, 이 경우 또한 하드웨어 구성 및 프로그래밍에 많은 시간을 소비해야만 하였다[1][2].

그런데 그래픽 프로그램 언어인 LabVIEW와 A/D 보드를 사용한 가상계측시스템을 구성하면, 모터의 운전성능 즉, 전기량과 기계량을 기존의 고가 측정 시스템에 비해 10%이하의 저가로 시스템을 구성할 수 있다. 이 시스템은 측정자료의 수집, 처리, 디스플레이가 모두 실시간으로 신뢰성 있게 이루어지고, Graphical user interface(이하 GUI) 기반으로 보다 쉽게 측정을 위한 프로그래밍을 수행할 수 있다는 장점을 갖는다[4][5].

본 논문에서는 유도형 리니어 모터(Linear Induction Motor : 이하 LIM)의 전기적, 기계적 성능에 관한 실시간 데이터 수집, 처리, 디스플레이를 위한, 가상계측(Virtual Instrument : 이하 VI)시스템을 제안하고 구현하고자 한다.

일반적으로 모터 성능에 관한 동특성 자료 중에서 중요한 요소인 전자기력은 회전형 모터의 경우는 토크메타나 동력계 등을 이용하여 측정을 하나, 1차측과 2차측이 비접촉 상태에서 운전되는 LIM에는 적용할 수가 없다. 그러므로 자기부상열차, 경전철 등에서는 별도의 3축 블록게이지를 제작, 로드셀을 설치하여 추력을 측정하기도 한다[6]. 그러나 로드셀에 의한 경우는 추력에 관한 신호를 실시간 수집, 처리하는데 한

\* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 準 會 員 : 忠南大 電氣工學科 碩士課程

§ 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2000年 7月 25日

最終完了 : 2001年 5月 2日

계를 가지므로, 가속도 센서에 의해 가속도를 측정 한 후, 부하의 질량을 곱해 운전상태의 기계적 추력을 측정하기도 한다[6].

그런데 이러한 방식 외에 공극쇄교자속을 오실로스코프 등과 같은 장비를 통해 직접 측정하거나, 또는 간접적으로 인가 전압과 저항에 의한 전압강하분의 차를 시간에 대해 적분하여 쇄교자속을 계산 추정함으로써 전자기적 추력을 측정할 수 있는 방법이 제시되었다[7]~[12]. 본 논문에서 LIM의 전자기력을 산정하는 방식은 서치코일에 의해 검출된 유기기전력에 의해 공극쇄교자속을 구한 후, 1차측 입력전류를 변수로 하는 d, q축 등가회로에서 추력식을 유도하여, 전자기적 추력을 산정하고 이를 분석, 파악하기가 용이하도록 소프트웨어적으로 모니터링을 할 수 있는 프로그래밍을 하여, 시스템 성능을 쉽고 정밀하게 파악할 수 있는 VI 시스템을 구성하였다.

그런데 LIM은 회전형 유도기와 달리 기하학적인 단부로서 인해, 속도가 증가함에 따라 공극자속이 불균일하게 분포되는 길이방향 단부효과와 인버터 저속 운전시, 시간고조파의 영향으로 전자기적인 노이즈가 많이 발생하는 등의 원인으로 인해 정밀한 자속검출이 어렵다. 이 때 공극쇄교자속을 검출하기 위해 1차측 tapped 코일을 이용하거나 서치코일을 사용하는데, tapped 코일은 이미 제작된 LIM에 적용하기 어려우므로, 본 논문은 서치코일을 1차측 상단 슬롯에 시행하여 공극쇄교자속을 검출하였다. 그런데 서치코일은 치당, 극당, 상당으로 모두 시행한 후, 1차측 상권선 시행방식과 동일하게 결선하여 공극쇄교자속을 측정 한 결과가 전자기적 노이즈의 영향 및 측정된 자속들 간에 위상관계 등이 가장 안정적임을 확인하였다.

또한 전원의 출력단에 CT와 PT를 포함하는 하드웨어 장치를 직접 구성하여, 전압과 전류신호를 A/D 보드를 통하여 수집한 후, 이를 소프트웨어적으로 처리하여 입력전류, 전압, 전력, 역률, 효율, 전자기적 추력 등에 관한 제반적인 LIM 성능을 실시간 측정하고 모니터링하는 시스템을 구현하였다. 본 시스템을 통해 측정된 결과의 검증 및 타당성을 입증하기 위하여, 정밀한 전력측정기로 평가받고 있는 고가장비인 Voltech사의 PM3300의 측정결과와 비교, 검증한 결과 매우 잘 부합됨을 보였다.

이로써 본 논문이 제안한 LIM 성능 모니터링 시스템은 하드웨어 구성 및 인터페이스를 위한 프로그래밍 작업을 통하여 저가로 구현함으로써 시간적, 경제적 측면을 모두 만족하는 신뢰성 있는 시스템임을 확인하였다.

## 2. 추력 및 전기적 특성 모니터링 시스템의 기본개념

모터의 성능은 구동 시스템 전체의 성능을 결정하는 매우 중요한 파라미터이므로 운전 성능 및 성능시험법은 매우 중요하다. 더구나 고정자와 회전자를 베어링과 축으로 지지하는 상태에서 운전하는 회전모터의 경우와는 달리 LIM의 경우는 1차측과 2차측이 비접촉인 상태에서 운전되므로, 정격상태에서의 성능시험이 매우 어렵다. 특히 LIM의 경우는 회전형 모터에서와 같이 토크메타나 동력계 등이 적용될 수 없으므로, 정격 및 과도운전 상태에서 발생하는 전자기적 추력의 측정이 기존의 방법으로는 불가능하다.

따라서 본 장에서는 LIM 1차측의 슬롯-치 부분에 별도의

서치코일을 시행하여, 이 코일에 유기되는 유도기전력을 신호로 받아 이를 소프트웨어적으로 처리하여 쇄교자속 및 발생 추력을 구한다. 더 나아가 분석 및 파악이 용이하도록 모니터링까지 할 수 있는 시스템의 기본개념을 제시하기로 한다.

### 2.1 추력의 실시간 모니터링

LIM의 1차측에 입력되는 전류와, 서치코일로부터 측정되는 자속 파형을 이용하여 LIM이 발생하는 추력특성을 계산하고 이를 실시간으로 모니터링을 하고자 한다. 따라서 d, q축 전류와 자속에 의한 추력식을 본 절에서 유도한다.

#### 1) 자속검출

LIM의 1차측 전류에 의하여 발생하는 공극자속은 와전류 및 발생 추력의 기본이 되므로, LIM의 성능에 가장 중요한 파라미터가 된다. 따라서 공극자속의 측정을 위하여 그림 1과 같이 LIM의 3상권선 시행 방식과 동일한 방법으로 서치코일을 감게된다. 즉 그림 1은 한 상에 대한 서치코일의 결선도이다. 서치코일에서 유도된 전압으로부터 식 (1)과 같이 각 상에 대한 공극자속을 산출할 수 있게 된다.

$$\lambda_{abc} = N\phi_{abc} = - \int e_{abc}(t) dt \quad (1)$$

여기서  $\lambda_{abc}$  는 쇄교자속,  $N$ 은 서치코일의 턴수,  $\phi_{abc}$  는 자속,  $e_{abc}(t)$  는 서치코일에 유도된 전압이다.

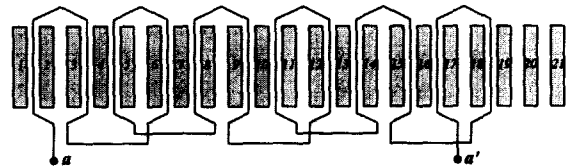


그림 1 LIM에 시행한 서치코일 분포 및 결선도

Fig. 1 Search coil placement of one phase having a short pitch (=2/3) winding

#### 2) 서치코일을 포함하는 등가회로 구성과 전자기적 추력

고정자 정지좌표계에서 인가되는 3상 전류에 의하여 유도되는 각 상의 공극쇄교자속은 식 (1)에 의해  $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$  로 얻게 되며, 이를 식 (2)와 같이 d, q축 전류 및 쇄교자속으로 변환하게 된다[7][10].

$$\begin{aligned} i_q &= i_a, \quad \lambda_{qm} = \lambda_a \\ i_d &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_c - i_b), \quad \lambda_{dm} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\lambda_c - \lambda_b) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda_{qm}, \lambda_{dm}$  은 쇄교자속의 q축과 d축 성분이다.

서치코일과 식 (2)로부터, 전자기적 추력을 실시간으로 모니터링 하기 위해서, 그림 2와 같이 1차측에 설치한 서치코일을 포함하는 LIM의 등가회로를 구성하고, 이로부터 식 (3)과 같은 추력식을 유도하게 된다.

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} L_m (i_{qs} i_{dr}' - i_{ds} i_{qr}') \\
 &= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (L_m i_{qs} i_{dr}' + L_m i_{ds} i_{qs} - L_m i_{qs} i_{ds} - L_m i_{ds} i_{qr}') \\
 &= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} [L_m (i_{dr}' + i_{ds}) i_{qs} - L_m (i_{qs} + i_{qr}') i_{ds}] \\
 &= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} [\lambda_{dm} i_{qs} - \lambda_{qm} i_{ds}]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서  $\tau$ 는 LIM의 극간격,  $L_m$ 은 공극 상호인덕턴스,  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}$ 는 고정자 전류의  $d, q$ 축 성분이며,  $i_{dr}'$ ,  $i_{qr}'$ 는 회전자 전류의  $d, q$ 축 성분을 각각 나타낸다.

또한 LIM의 동특성 방정식은 식 (4)와 같다.

$$Ma = F_x - F_l \tag{4}$$

여기서  $M$ 은 LIM의 부하질량,  $a$ 는 가속도,  $F_l$ 은 부하의 요구추력,  $F_x$ 는 발생추력을 각각 나타낸다.

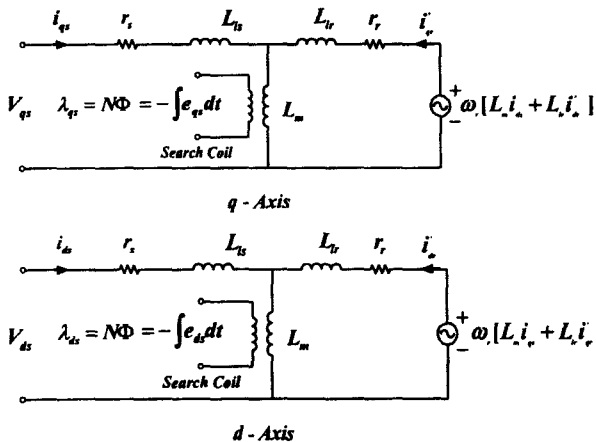


그림 2 서치코일을 포함하는 d,q 등가회로  
 Fig. 2 D,Q equivalent circuit considering induced voltage detected by the search coil

3) 추력 특성을 모니터링하기 위한 시스템의 기본개념 및 불력선도

서치코일과 식 (1)에 의하여 검출되는 자속  $\lambda$ 와, 식 (2)의 1차측 인가전류  $i_d, i_q$ 를 식 (3)에 대입하여 추력 특성값을 얻게 되는데, 그림 3은 이를 실시간으로 모니터링 하기 위하여 구성하는 시스템의 불력선도이다. 즉, A/D보드에 입력된 서치코일에 유도된 각 상의 전압  $e_a(t), e_b(t), e_c(t)$ , 1차측 전류 신호  $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ 를  $d, q$ 축 전류로 변환하고, 각 상의  $d, q$ 축의 공극쇄교자속과 전류를 구하여 전자기적 추력을 식 (3)에 의하여 구하게 된다.

그림 3에서 VI 시스템은 서치코일과 CT, PT로부터 검출되는 아날로그 쇄교자속, 전류신호를 A/D 변환한 후, 이러한 데이터들을 소프트웨어적으로 처리하여 운전성능의 파악이

용이한 형태로 LIM의 제반성능을 모니터링 할 수 있도록 PC상에 구현하는 가상계측시스템을 의미한다.

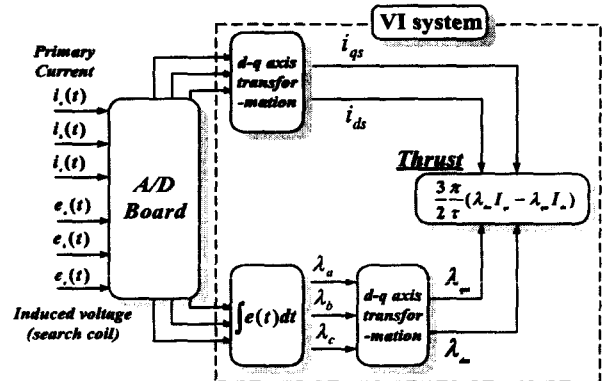


그림 3 검출된 공극쇄교자속과 1차측 전류로부터 추력을 산출하기 위한 불력선도  
 Fig. 3 Block diagram for the thrust calculation from air-gap linkage flux and primary current measurements

2.2 전기적 특성의 모니터링

그림 3에서 전류, 전압을 각각 감지하는 CT와 PT를 거쳐 A/D 보드에 입력된 전압, 전류의 순시치 신호들이 일단 디지털 신호로 변환되면, PC상에서 소프트웨어적인 연산 및 데이터 처리를 통하여 3상 전류, 전압, 유효전력, 무효전력, 역률 등의 전기적 특성들을 모니터링하게 된다. 이 경우 전압과 전류의 순시적인 아날로그 신호에 대한 실효치는 식 (5)에 의해 각각 연산하게 된다.

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V^2(i)} \\
 I_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I^2(i)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서  $n$ 은 1주기동안 샘플링 된 데이터의 수이다. 전압 또는 전류의 순시적인 아날로그 신호는 식 (6)으로 표현되는 이산 푸리에 변환(DFT)에 의해 주파수 영역 분석이 이루어진다[13].

$$\begin{aligned}
 X_k &= \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{j2\pi k i/n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n-1 \\
 x_i &= \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} X_k e^{-j2\pi k i/n} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

여기서  $n$ 은 주파수 영역과 시간영역 모두에서의 샘플링 수이다.

LIM의 전압 및 전류의 실효치를 식 (5)로부터 얻어서 3상 전력을 산정하기 위해서는 그림 4와 같은 2전력계법 전력측정 회로를 구성하게 된다.

이 때 3상 전력은 식 (7)과 같이 표현된다. 여기서,  $P_1$ 과  $P_2$ 는 각각 전력계 1, 전력계 2가 나타내는 값이다.



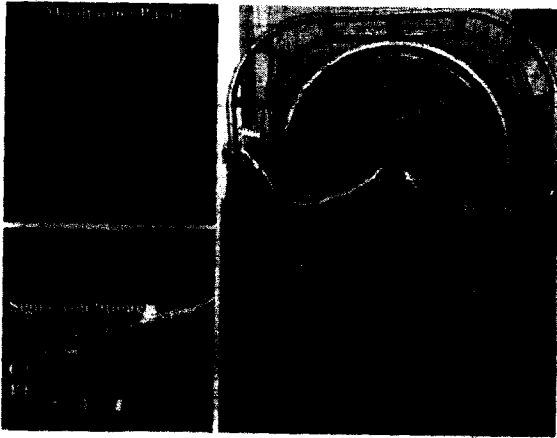


그림 7 LIM 성능 모니터링 시스템의 사진  
Fig. 7 Photograph of the performance monitoring system

3.2 시스템의 개요

그림 6은 그림 3 및 그림 4의 개념을 그림 5에 적용하여, LIM의 주요 운전성능을 자동으로 모니터링하기 위해 구성된 전체적인 시스템 블록도이며, 그림 7은 실제로 구성된 시스템의 사진이다. 1차측 입력 전류, 전압, 전력, 역률 특성 등에 관한 전기량과 추력, 속도, 효율 특성에 관한 성능을 모니터링 하게 된다.

LIM 운전성능에서 특히 중요한 요소인 전자기적 추력은 물론이고, 그림 3의 개념을 구현하여 각 운전성능을 실시간으로 모니터링 하기 위해서는 우선 전원의 성능 파악이 매우 중요하다.

즉 상용전원 또는 인버터로부터 LIM에 공급되는 전기량에 관한 자료를 획득하기 위해서는 우선적으로 입력 전압과 전류의 순시치가 정밀하게 측정되어야 한다. 모니터링 시스템에서 1차측 인가전압, 전류를 측정하기 위하여, 그림 6에서와 같이 PT와 CT를 사용하여 전압 및 전류를 검출한 후, 이 신

호를 A/D 보드의 아날로그 입력단에 입력시킨다. 이 경우에 상용전원에서는 입력전원이 정현적이므로 문제가 되지 않으나, 인버터 전원에서는 시간고조파를 함유하므로 공급전원의 순시파형은 그대로 유지시킨 채, 단지 크기만이 가변되어야만 한다. 이를 위해서 시간고조파 함유 공급전원에서의 전압, 전류를 정밀하게 고려할 수 있는 기능을 특별히 갖는 CT와 PT를 사용해야만 한다.

따라서 아날로그 전압, 전류가 CT, PT를 거쳐 A/D 보드에 입력되고, 디지털화 되어 식 (5)로부터 식 (8)까지에 의한 연산을 통해 전기량에 관한 데이터가 수집되면, 이를 즉시 처리하여 성능을 실시간 모니터링하게 된다. 또한 그림 6과 같은 모니터링 시스템으로 측정된 전기량 측정결과의 타당성을 검증하기 위하여, 그림 6과 같이 고조파 특성을 고려한 측정이 가능한 고가 장비인 Votech사의 PM3300의 측정결과를 GPIB를 통해 PCMCIA 카드가 장착된 노트북에서 수집, 처리할 수 있도록 하는 LabVIEW를 이용한 별도의 가상계측시스템을 별도로 구성하여, 본 논문에서 제안한 그림 3의 개념을 구현하여 얻은 측정된 전기량들과 상호 비교하도록 하였다.

3.3 모니터링을 위한 프로그래밍

그림 3의 VI 시스템, 그림 4의 전력 측정 시스템을 포함하는 그림 6, 그림 7과 같은 모니터링 시스템에서 각종 신호 및 데이터를 처리하여 전기적, 기계적 파라미터의 값을 자동으로 산정하여 모니터링 하기 위해서는 소프트웨어적인 처리가 필요하다. 이를 위해서 그래픽 프로그램 언어로 각종 데이터를 자동으로 처리하고 모니터링 할 수 있는 상용프로그램인 LabVIEW를 이용하였고, 그림 8과 같은 블록선도로 구성된다. 즉, CT, PT를 통해 입력되는 각 상의 1차측 아날로그 전류신호  $i_a, i_b, i_c$ , 전압신호  $v_a, v_b, v_c$  와 서치코일에 유도된 전압  $e_a, e_b, e_c$ , 엔코더에서 출력되는 펄

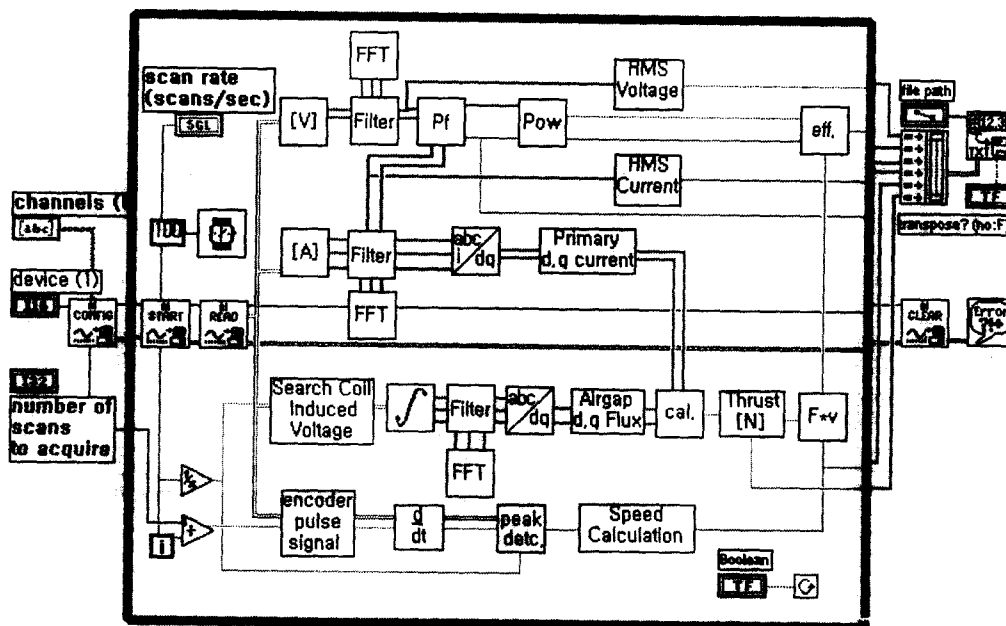


그림 8 그래픽 프로그램 언어인 LabVIEW를 이용하여 구성된 모니터링 프로그래밍 블록도  
Fig. 8 Monitoring block diagram using the graphical programming language LabVIEW

스 신호를 총 9개 채널에서 동시에 읽어들이게 된다. 그런 다음 식 (5)로부터 식 (9)까지에 의해 실효치 전압, 전류, 3상 입력전력, 역률 등이 계산되고 이를 실시간으로 모니터링하게 된다. 이 때 입력되는 신호들은 전자기적 노이즈를 제거하기 위하여 필터링하게 되며, 그림 3의 과정에서 식 (3)으로부터 전자기적 추력이 계산되고, 식 (9)에 의해 효율이 계산되어 각각 모니터링된다.

상용전원으로 운전하는 경우에는 A/D보드 내에 내장된 3개의 타이머/카운터를 그림 9의 (a)와 같이 커넥터에서 연결한 후, 입력되는 엔코더 신호의 상승에지에서 펄스수를 카운팅하여 식 (10)에 의해 속도를 계산하고 모니터링할 수 있다.

그런데 인버터로 운전하는 경우에는 전자기적 노이즈에 의하여 엔코더 출력펄스신호에 노이즈가 함유되므로, 펄스신호의 상승에지를 카운팅하여 구해지는 속도가 실제 속도와 비교하여 매우 다르게 산출된다. 그러므로 본 논문에서는 A/D보드내의 타이머/카운터를 이용하지 않고, 1차측 입력 전압, 전류 신호를 읽어들이는 방식과 동일하게 아날로그 입력 채널에 엔코더 출력신호를 입력하여 이 신호를 미분한 후, 그림 9의 (b)와 같이 일정한 상,하한치 값을 설정하여 상한치 이상의 피크치를 검출하였다. 그런 후 검출된 피크의 수를 식 (10)의 엔코더 출력 펄스의 카운팅 수에 대입하여 속도를 산출 및 모니터링하게 된다.

$$v = \frac{\text{counting number of encoder pluse}}{1024 \cdot t} \times 2\pi r \text{ [m/s]} \tag{10}$$

여기서,  $t = \frac{\text{sample number}}{\text{sampling rate [sample number/second]}}$

이고,  $r$ 은 그림 5에서 디스크 휠의 반지름이다.

3.4 모니터링을 위한 판넬 구성

인버터 60[Hz] 운전시, 그림 10은 그림 6, 그림 7과 그림 8에 의해 제안된 가상계측시스템에 의해 모니터링된 입력전류, 전압, 전력, 역률 및 추력, 효율 등에 관한 결과들을 모두 한 화면에서 나타내도록 소프트웨어적으로 처리하여 구현한 패

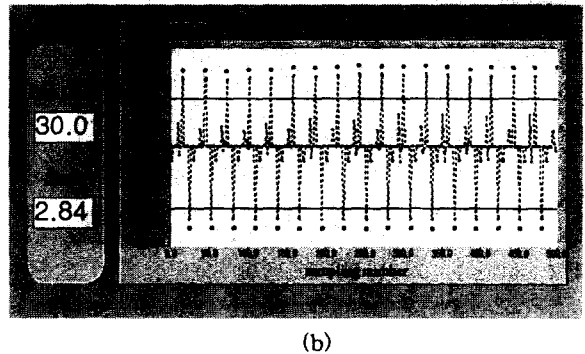
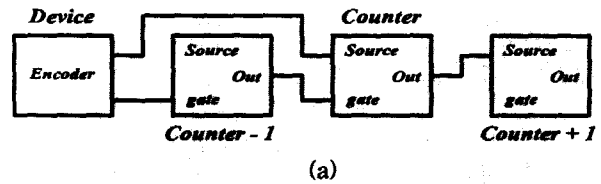


그림 9 속도 모니터링을 위한 엔코더 출력 펄스신호 카운팅 (a) A/D보드에 내장된 타이머/카운터를 이용한 엔코더 출력 펄스신호의 카운팅(상용전원) (b) 엔코더 펄스 미분신호에 의한 피크치 카운팅(인버터) Fig. 9 Encoder pulse signal counting for monitoring speed

널이다. 물론 필요한 경우에는 각각의 성능결과만을 분석, 파악하기 편리한 형태로 모니터링이 가능하게 되어 있다.

즉 그림 10의 판넬에 별도의 sub VI를 구성하여, 그림 10의 하단 좌측부의 FFT 선택 버튼을 누르면, A/D 보드 각 입력신호들의 순시파형과 이를 식 (6)을 사용한 FFT 분석결과 및 필터링 된 입력신호의 순시파형과 FFT 분석결과를 그림 11과 같이 도시하게 된다. 이 경우에, 필터는 소프트웨어적으로 구현한 2차 버터워스 필터를 사용하였다. 필터를 사용하는 이유는, 전자기적 노이즈에 의해 그림 3에 의해 모니터링되는 전자기적 추력은 실제 실험치와 많은 오차를 보이므로, 입력되는 각 상 전류파형과 서치코일에 유도되는 전압 파형을 필터링하여 그림 11에서와 같이 기본파만을 성분으로 하는 신호를 전자기적 추력 산출에 사용하게 된다.

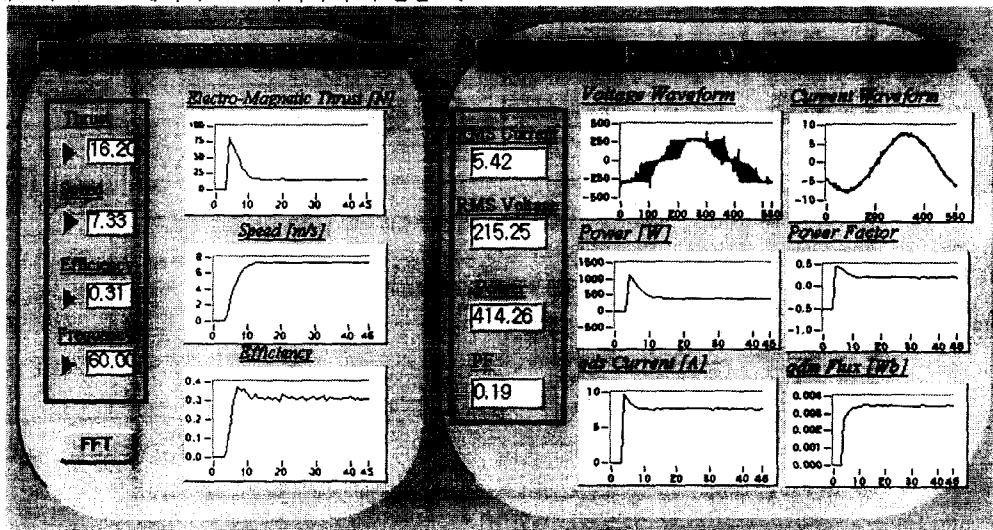


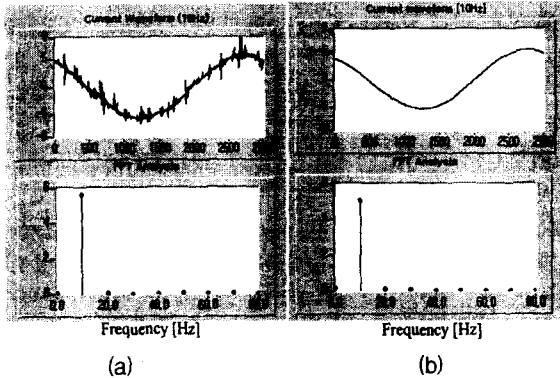
그림 10 LIM 성능에 관한 실시간 모니터링 된 결과들이 도시되도록 소프트웨어에 의해 구현한 패널 Fig. 10 Panel to present the LIM performance measured in real-time

#### 4. 모니터링 시스템의 LIM 성능시험 결과

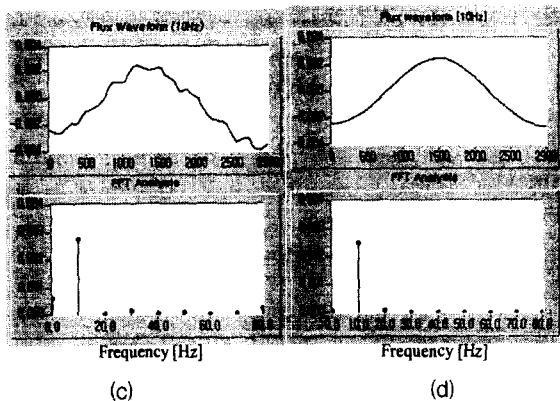
##### 4.1 상용전원과 인버터 전원에서의 전기량 측정결과

그림 12와 그림 13은 그림 6, 그림 7과 같이 구현된 시스템으로 상용전원, 인버터 전원 각각에서의 1차측 입력전류, 전압측정 결과를 각각 도시한 것이며, 측정의 정밀성을 비교·검증하기 위하여 Voltech사의 전력분석기(PM3300)의 측정결과와 비교, 검토한 결과들이다.

그림 12에서 상용전원의 경우는 전압, 전류의 측정결과가 고가장비인 PM3300으로 계측한 결과와 본 논문에서 10% 이하의 저가로 구현한 모니터링 시스템의 측정결과가 잘 부합됨을 볼 수 있다. 또한 그림 13에서 인버터의 경우는, 전류의 측정결과는 각각의 측정결과가 잘 부합되나, 전압 측정결과는 그림 6, 그림 7과 같이 본 논문에서 제안한 모니터링 시스템의 측정결과가 다소 크게 측정되었다. 이는 전압신호에 포함된 전자기적 노이즈가 하드웨어적인 A/D 변환 과정에 영향을 주어 발생한 오차라 사료된다.



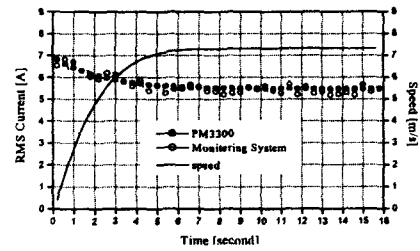
(a) 필터링 전, a상 전류의 순시파형 및 FFT 분석결과  
(b) 필터링 후, a상 전류의 순시파형 및 FFT 분석결과



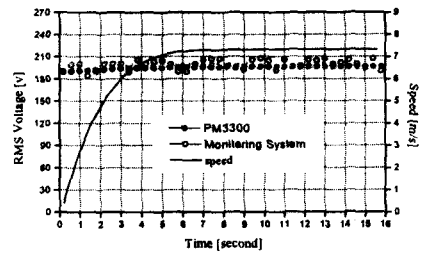
(c) 필터링 전, a상 검출자속의 순시파형 및 FFT 분석결과  
(d) 필터링 후, a상 검출자속의 순시파형 및 FFT 분석결과

그림 11 필터링 전·후, a상 전류와 검출자속의 순시파형 및 FFT 분석결과 (10Hz 운전시)

Fig. 11 current and flux instantaneous waveforms in phase A and the results of FFT analysis (10 Hz)



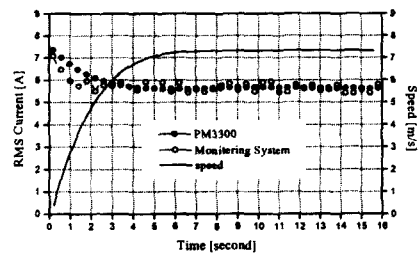
(a) 전류



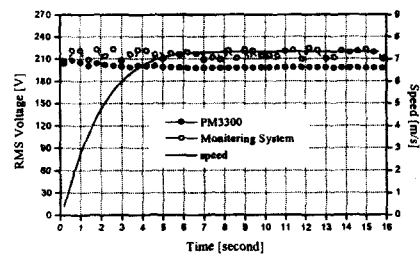
(b) 전압

그림 12 상용전원에서 모니터링된 전류, 전압

Fig. 12 RMS current and RMS voltage monitored in a commercial source



(a) 전류



(b) 전압

그림 13 인버터 전원에서 모니터링된 전류, 전압

Fig. 13 RMS current and RMS voltage monitored in an inverter (60 Hz)

##### 4.2 추력 측정 결과

###### 1) 기동추력 특성

그림 14는 인버터로 LIM을 운전하였을 경우, 기동시 별도로 설치한 로드셀로 측정된 추력과 제안한 모니터링 시스템에 의해 측정된 추력을 비교한 것이다. 10, 20[Hz]로 LIM을 운전하였을 경우, 그림 11에서와 같이 필터링을 하지 않은 전류와 검출자속 신호에 의해 모니터링 시스템에 의해 측정된

추력과 로드셀로 측정된 추력은 큰 차이를 보이는데 반해, 필터링 한 신호로부터 산출되는 기동시, 전자기력 추력과 로드셀 측정결과 사이의 차이는 적으며, 30[Hz] 이상에서는 측정 결과들은 거의 잘 일치함을 알 수 있다.

2) 운전상태에서의 추력 특성

그림 15는 10, 30, 60[Hz] 인버터 각 출력 주파수대에서 그림 6과 그림 7과 같이 구성된 모니터링 시스템으로 측정된 운전상태에서의 추력특성이다. 정상상태에서 15[N] 정도가 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 15의 결과로부터, 본 논문에서 제안한 모니터링 시스템은 LIM의 운전특성 중 특히 중요한 요소인 전자기력 추력에 관한 데이터를 실시간으로 수집, 처리, 모니터링이 가능하며, 운전성능 파악에 필수적인 시스템임을 알 수 있다.

4.3 역률, 효율 측정 결과

본 논문에서 제안한 모니터링 시스템은 LIM의 전기적, 기계적 성능을 판단하는 근거인 역률 및 효율 특성을 실시간 수집, 처리 및 도시가 가능한 시스템이다.

그림 16은 식 (8)과 식 (9)에 의해 60[Hz] 인버터 운전시, 모니터링 된 역률과 효율 특성을 각각 나타낸다.

기동시에 그림 12, 그림 13과 그림 14에서와 같이 기동전류가 크게 요구되므로, 유효분 전력의 증가로 역률이 좋고 정상상태로 갈수록 유효분 전력이 감소하므로 역률은 나빠진다.

최대효율은 38% 정도이며 정상상태에서의 효율은 30%, 최대역율은 60%, 정상상태 역율은 20% 정도로 측정되었다.

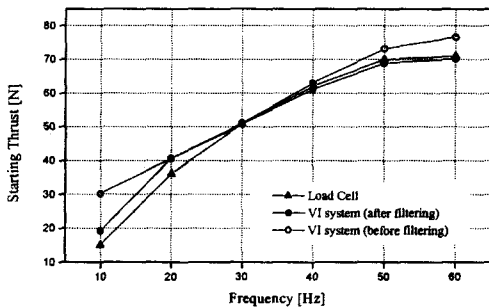


그림 14 기동주파수에 따른 추력 비교  
Fig. 14 Comparison of a thrust due to starting frequency

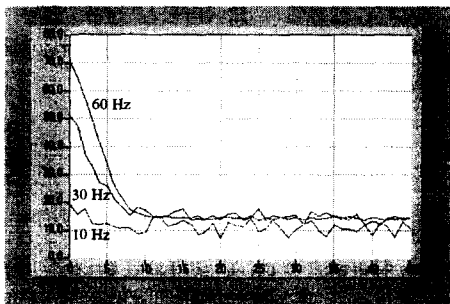


그림 15 인버터 출력 주파수에 따른 운전시 추력 특성  
Fig. 15 Thrust characteristics due to inverter output frequency operating LIM

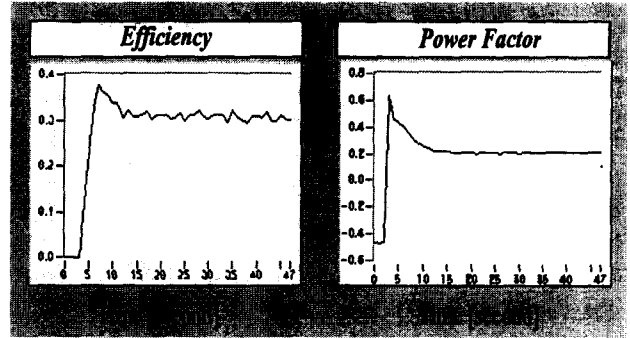


그림 16 인버터 60[Hz]운전시, 역률과 효율 특성  
Fig. 16 Characteristics of power factor and efficiency (60 Hz)

6. 결 론

LIM은 1차측과 2차측이 비접촉 상태에서 운전되므로, 베어링으로 지지되어 운전되는 회전형 모터에 적용되는 방법으로는 전자기력의 측정이 불가능하다. 즉 운전성능 특성의 측정 및 파악이 어려운 LIM의 운전특성을, 서치코일, CT, PT와 A/D 보드, PC로 구성된 하드웨어와 인터페이스 및 모니터링을 위한 소프트웨어로 측정 및 파악이 용이하며, 정밀하게 측정, 시험 할 수 있는 저가의 VI 시스템을 본 논문에서 제안하였다.

즉 1차측에 서치코일을 설치하여 이로부터 유도기전력, 자속 신호를 받아 자동 처리하는 시스템을 구성하였다. 또한 d, q축 등가회로 상에서 운전성능을 충분히 파악 할 수 있도록 전자기력과, 각종 전기량을 모니터링 하는 시스템을 제안하고 이를 실제로 구성하여 시험하였다.

제안된 VI 시스템은 그래픽 프로그램 언어인 LabVIEW와 A/D 보드를 이용한 LIM 성능 On-Line 모니터링 시스템으로써 입력전류, 전압, 전력, 역률 및 전자기력, 효율, 속도 등, 저가로 제반적인 LIM 성능에 관한 데이터를 실시간으로 수집, 처리, 모니터링이 가능한 신뢰성 있는 시스템이다. 또한 제안된 시스템 구성을 위한 프로그래밍은 GUI 기반으로, 보다 쉽게 측정할 수 있는 VI 시스템이다.

본 논문에서 제안한 시스템의 신뢰성 여부를 판단하기 위하여, 제안 시스템에 비해 10배 이상의 고가장비인 Voltech사의 전력분석기(PM3300)의 측정치와 비교, 검토한 결과, 그림 12와 그림 13에서 제시된 바와 같이 매우 잘 부합됨으로써 저가이면서도 신뢰성이 좋은 시스템을 구현할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Hamid Nejjari and Mohamed El Hachemi Benbouzid, "Monitoring and Diagnosis of Induction Motors Electrical Faults Using a Current Park's Vector Pattern Learning Approach", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 36. No. 3. pp. 730-735, 2000

[2] Luiz Antonio de Souza Ribeiro, "Real-Time Estimation of the Electric Parameters of an Induction Machine Using Sinusoidal PWM Voltage Waveforms", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 36. No. 3. pp.



- 743-754, 2000
- [3] O.V. Thorsen and M. Dalva, "Methods of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors", ETEP, vol. 8. No. 5. pp.383-395, 1998
  - [4] Changting Wang and Robert X. Gao, "A Virtual Instrumentation System for Integrated Bearing Condition Monitoring", IEEE, Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 49, No. 2. pp. 325-332, 2000
  - [5] Donald R. Zrudsky and James M. Pichler, "Virtual Instrument for Instantaneous Power Measurements", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 41. No. 4. pp. 528-533, 1992
  - [6] 장석명, 박영태, 정연호 "VVVF 인버터로 운전되는 LIM의 운전패턴에 따른 동특성 해석", 대한전기학회논문지, 제45권, 제7호, pp932-941, 1996
  - [7] D.W.Novotny and T.A.Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", 1997
  - [8] Peter Vas, "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines", 1993
  - [9] Allan B. Plunkett, "Direct Flux and Torque Regulation in a PWM Inverter-Induction Motor Drive", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-13, No. 2, pp. 139-146,1977
  - [10] Donald S. Zinger, "A Direct Field-Oriented Controller for Induction Motor Drives Using Tapped Stator Windings", IEEE Trans. on Power Electron., vol 5. No. 4. pp. 446-453,1990
  - [11] 임달호, 권병일 외, "Stator Tapped Coil을 이용한 편측식 선형유도전동기의 직접벡터제어", 대한전기학회, 하계학술대회, 1992
  - [12] Dal-Ho Im, Byung-Il Kwon, "Direct Vector Control Scheme of Low-Speed LIM Using Primary Tapped Windings", Proceedings of ISEM Korea, 1994
  - [13] LabVIEW User Manual, National Instruments, 1996

저 자 소 개



장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일 생. 1976년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 졸업. 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업 (공박). 1989년 미국 Univ. of Kentucky(Post-doc). 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원, 편집이사, 편집위원장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템부문화 부회장 및 편집위원장

Tel : 042-821-5658

E-mail : smjang@ee.cnu.ac.kr



장 건 우 (張 建 宇)

1977년 7월 20일 생. 2000년 충남대 물리학과 졸업. 2000년~현재 충남대 전기공학과 석사과정

Tel : 042-821-7608

E-mail : hyena@tjssm.co.kr



이 성 호 (李 成 浩)

1971년 11월 1일 생. 1997년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업. 1999년~현재 충남대 대학원 박사과정

Tel : 042-821-7608

E-mail : shlee@ruru.ee.cnu.ac.kr



정 상 섭 (鄭 相 燮)

1971년 1월 29일 생. 1996년 충남대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 졸업. 2001년 동 대학원 박사과정 수료

Tel : 042-821-7608

E-mail : sangsub@ee.cnu.ac.kr