2001년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집 (2001.4.19~21)

고속 엘리베이터 시스템용 시뮬레이터 개발

류형민*, 김성준*, 설승기*, 권태석**, 김기수**, 심영석**, 석기룡**
*서울대학교 전기공학부 **현대 엘리베이터(주)

Development of Simulator for High-Speed Elevator System

Hyung-Min Ryu*, Sung-Jun Kim*, Seung-Ki Sul*, Tae-Seok Kwon**, Ki-Su Kim**,
Young-Seok Shim**, Ki-Riong Seok** *SoEE SNU, **Hyundai Elevator Co. Ltd.

Abstract - This paper presents the simulator system of high-speed elevator system, which can be implemented as 3-mass system as well as equivalent 1-mass system. In order to implement the equivalent inertia of total elevator system, conventional simulator has generally utilized mechanical inertia (flywheel) with large radius, which makes the size and weight of total simulator system large. In addition, the mechanical inertia should be replaced each time in order to test the another elevator system. In this paper, the simulation method using electrical inertia is presented so that the volume and weight of simulator system are greatly reduced and the adjustment of value of the inertia can be achieved easily by software. Experimental results show the feasibility of this simulator system.

1. 서 론

일반적으로 엘리베이터 제조 회사들은 개발 엘리베이터 시스템을 시험하기 위한 테스트 타워를 보유하고 있다. 이곳에서는 엘리베이터 시스템이 설치될 실제 환경과 유사한 조건하에서 전동기 구동 시스템뿐만 아니라 각종 통신 및 기계 시스템을 시험한다. 전동기 구동 시스템의 경우 탑승 인원에 따른 부하 시험, 연속 운전을 통한 온도 시험, 그리고 기계 시스템의 진동 특성을 고려한 제반 제어기의 성능 시험 등이 수행된다. 이러한 과정을 통해 시스템의 신뢰성이 검증되며 승객 수송용 엘리베이터의 경우 특히 안전성이 중요하기 때문에 제품 출하전 상당 기간의 검증이 요구된다.

이와는 별도로 전동기 구동 시스템의 다양한 부하 및 운전 거리 조건에 대한 시험을 수행하기 위해서 일반적으로 시뮬레이터를 사용하는데 이는 전체 엘리베이터 시스템을 등가 1관성계로 모델링하여 근사적으로 구현된다. 테스트 타워의 경우 탑승 인원에 따른 부하의 구현을 위해서는 매번 그에 상응하는 중량체로의 교체가 요구되며 유한한 타워 높이로 인해 운행 거리에 제약을 받는다. 기존의 시뮬레이터는 구동 전동기, 중력 방향의 일정 부하를 구현하기 위한 직류 전동기, 그리고 전체 시스템 관성에 해당하는 기계적인 관성체(flywheel)로 구성되어 있다. 이 기계적인 관성체는 승강기, 카운터웨이트, 각종 시브 및 로프의 관성을 전동기축에 대해 환산하여 등가적으로 구현되므로 그 직경과 질량이 매우 커서 시뮬레이터의 부피 및 무게의 증가를 초래한다. 또한 다양한 기종의 시스템을 시험하기 위해서는 기계적인 관성체를 매번 교체해야 하는 수고가 요구된다.

따라서, 본 논문에서는 기존의 기계적인 관성체 대신 전기적인 관성체를 구현하여 시뮬레이터의 부피 및 무게를 크게 감소시키고 간단한 소프트웨어적인 조작만으로 다양한 시스템의 시험을 가능케 하였다. 또한 본 시뮬레이터는 로프의 탄성 계수를 고려한 3관성계 시스템을 구현하여 실제 승강기에 발생하는 종진동을 구현하였다.

2. 본 론

2.1 고속 엘리베이터 시스템

일반적인 고속 엘리베이터 시스템의 대략적인 기계 구조는 그림1과 같다. 권상기는 최상층의 기계실에 위치하며 구동 전동기, 주 시브(Sheave), 그리고 브레이크 장치로 구성되어 있고, 카운터웨이트쪽에는 보조 시브가 위치해 있다. 승강기와 카운터웨이트는 움직 도르래를 통해 구동 전동기와 연결되고 승강기 위치에 따른 로프의 무게차를 보상하기 위해 아래쪽에 보상용 시브와 로프가 설치된다. 이러한 시스템에서 구동 전동기가 발생시키는 힘은 대략적으로 승강기와 카운터웨이트의 무게차에 해당하는 중력 방향의 힘과 승강기, 카운터웨이트, 그리고 각종 시브들을 구동 전동기축에 대해서 환산한 등가 관성을 가속하는데 필요한 힘의 합에 해당한다. 이와 같이 엘리베이터 기계 시스템을 등가 1관성계로 근사하기 위해서는 로프의 탄성 계수가 무한대라는 가정이 필요하다. 그러나 실제로는 로프의 탄성 계수가 유한한 값을 갖기 때문에 승강기와 카운터웨이트는 각각 독립적인 관성체로 작용하고 일반적으로 수Hz대의 공진 주파수가 존재한다. 이로 인해 승강기에 종진동이 발생하고 이를 억제하기 위해서는 속도 제어기의 응답성에 제약이 따른다. 속도 제어기의 응답성 저하는 위치 제어기의 성능을 떨어뜨리고 특히 승강기의 착상시에 지연을 발생시킨다. 따라서 속도 제어기의 응답성을 높게 설정하면서 종진동의 발생을 억제하기 위해서는 승강기의 가속도를

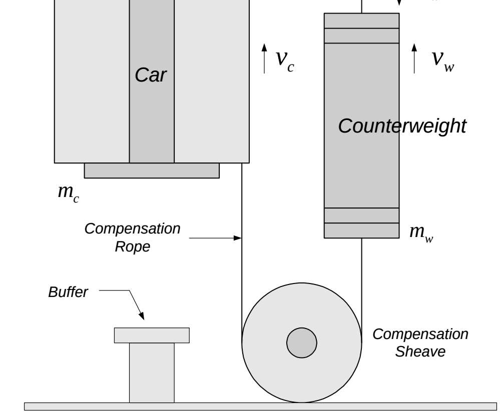

그림1. 고속 엘리베이터의 기계적인 구성도.

추정 또는 직접 측정하여 궤환하는 제어 기법을 일반적으로 사용한다[1-2].

2.2 등가 1관성계 시스템의 구현 방법

실제 엘리베이터 시스템을 등가 1관성계로 모델링하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_e = J_{eq}\frac{d\omega_m}{dt} + T_L \tag{1}$$

여기서, T_e는 전동기 출력 토오크, J_{eq}는 등가 전체 시스템 관성, ω_m은 전동기 회전 속도, 그리고 T_L은 부하 토오크에 해당하며 대부분 승강기와 카운터웨이트의 무게차에 의한 일정한 중력 방향 부하에 해당한다.

시뮬레이터 시스템은 다음과 같다.

$$T_e = J_0\frac{d\omega_m}{dt} + T_L^{'} \tag{2}$$

여기서, J_0는 시뮬레이터의 관성이고 $T_L^{'}$은 부하 토오크로 대부분 직류 전동기의 출력 토오크에 해당한다.

식(1)과 식(2)를 통해 실제 시스템의 부하 상황을 구현하기 위해서는 직류 전동기는 식(3)과 같이 일정한 중력 방향의 부하 토오크와 실제 시스템의 등가 관성에서 시뮬레이터 시스템의 관성을 뺀 만큼에 해당하는 관성을 가속하는데 필요한 토오크를 발생시켜야 한다.

$$T_L^{'} = \left(J_{eq} - J_0\right)\frac{d\omega_m}{dt} + T_L \tag{3}$$

여기서, 중력 방향 부하 토오크는 탑승 인원에 따른 승강기의 무게와 카운터웨이트의 무게차로부터 계산된다. 그리고 가속 토오크는 기존의 기계적인 관성체에 의해 발생하는 토오크로서 이를 전기적으로 구현하기 위해서는 전동기의 가속도 정보가 필요하다. 일반적으로 속도 정보를 얻기 위해 사용되는 엔코더 펄스 신호로부터 가속도 정보를 얻는 방법에는 여러 가지가 있지만[3-5] 본 시뮬레이터 시스템에서는 속도 정보로부터 중간 주파수 대역 통과 필터를 사용하여 가속도를 얻는 간단한 방법을 사용하였다.

2.2 3관성계 시스템 구현 방법

로프의 탄성 및 댐핑 계수가 실제로는 유한한 값을 가지므로 권상기, 승강기, 그리고 카운터웨이트를 각각 독립적인 관성체로 모델링하고 로프의 질량을 무시하면 전체 엘리베이터 시스템은 식(4)와 같은 상태 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\\ \dot{x}_4\\ \dot{x}_5\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1\\ \frac{k_c}{m_c} & 0 & \frac{-b_c}{m_c} & 0 & \frac{b_c}{m_c}\\ 0 & \frac{k_w}{m_w} & 0 & \frac{-b_w}{m_w} & \frac{-b_w}{m_w}\\ \frac{-k_c R_m^2}{J_m} & \frac{k_w R_m^2}{J_m} & \frac{b_c R_m^2}{J_m} & \frac{-b_w R_m^2}{J_m} & \frac{-(b_c+b_w)R_m^2}{J_m}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\\ x_5\end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\\ \frac{R_m}{J_m}\end{bmatrix}u + \begin{bmatrix}0\\ 0\\ -g\\ -g\\ 0\end{bmatrix} \quad : \quad \dot{\mathbf{x}} = A\,\mathbf{x} + B u + W \tag{4}$$

여기서, k_c, k_w는 각각 승강기와 카운터웨이트에 연결된 로프의 탄성 계수이며 근사적으로 로프 길이에 반비례하는 관계를 나타낸다. 그리고 d_c, d_w는 로프의 댐핑 계수에 해당된다. R_m은 주 시브의 반경을 나타내며 J_m은 주 시브의 관성값과 보조 시브의 전동기축에 대한 환산 관성값의 합에 해당한다.

상태 변수와 입력 변수는 식(5)와 같고 출력 변수, 즉 측정 신호는 전동기의 회전 속도이다.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix}x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5\end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix}d_c & d_w & v_c & v_w & v_m\end{bmatrix}^T,$$
$$u = 2\cdot T_e,$$
$$y = C\,\mathbf{x} = \begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\mathbf{x}. \tag{5}$$

식(4)의 상태 방정식으로부터 시뮬레이터, 즉 직류 전동기의 토오크 지령값은 식(6)과 같이 계산될 수 있다.

$$T_L^* = (J_m - J_0)\frac{d\omega_m}{dt} + 0.5\cdot R_m\left(k_c d_c - k_w d_w - b_c v_c + b_w v_w + (b_c + b_w)v_m\right) \tag{6}$$

이 때, 로프의 탄성 및 댐핑 계수는 최고층, 중간층, 최저층에서 각각 측정한 다음 승강기의 위치에 따라 보간법을 사용하여 연속적으로 변화시킨다.

식(6)을 보면 등가 1관성계 시스템과 마찬가지로 3관성계 시스템의 경우도 전동기의 가속도 정보를 요구한다. 하지만 실제로는 J_m과 J_0의 차이가 매우 작으므로 식(6)의 첫째 항은 무시될 수 있다. 따라서 3관성계 시스템은 전동기 속도의 적분만으로 구현될 수 있으므로 속도의 미분 정보를 사용하는 등가 1관성계 시스템에 비해 보다 안정적이고 빠른 응답성을 얻을 수 있다.

이상과 같이 3관성계로 구현할 경우 실제 엘리베이터 시스템과 같이 공진 주파수에 의한 승강기의 가속도에 존재하는 리플을 구현할 수 있다. 따라서 이러한 시뮬레이터를 사용하여 승차감 개선을 위한 승강기의 종진동을 억제하는 연구를 수행할 수 있다.

2.3 실험

2.3.1 시뮬레이터 시스템의 구성

시뮬레이션 대상 시스템은 기어리스 구동 방식으로 정격 속도가 240m/min이고 최대 탑승 인원은 24명이다. 시뮬레이터 시스템의 기계적인 구조는 그림2와 같다. 시험 대상 구동 전동기는 40kW의 표면부착형 영구 자석 동기 전동기이고 그 사양은 표1과 같다. 부하측 시뮬레이터로는 75kW의 타여자 직류 전동기가 사용되었다. 실제 토오크를 측정하기 위해 토오크 센서가 장착되어 있고 속도 정보를 얻기 위해 동기기와 직류기측에 각각 8096ppr, 10000ppr의 엔코더가 취부되어 있다. 속도 계산은 M/T 방식을 사용하였고 저속에서 안정된 제어를 수행하기 위해 엔코더 신호를 4체배하여 사용하였다.

전기적인 구동 장치로는 동기 전동기와 직류 전동기에 동일하게 400A/1200V급 IGBT를 사용한 PWM 인버터, PWM 컨버터, 그리고 TMS320VC33 DSP를 사용한 제어 보드가 사용되었다. 전원 전압은 440V이고 직류단 전압은 700V로 승압 제어된다. 두 개의 구동 장

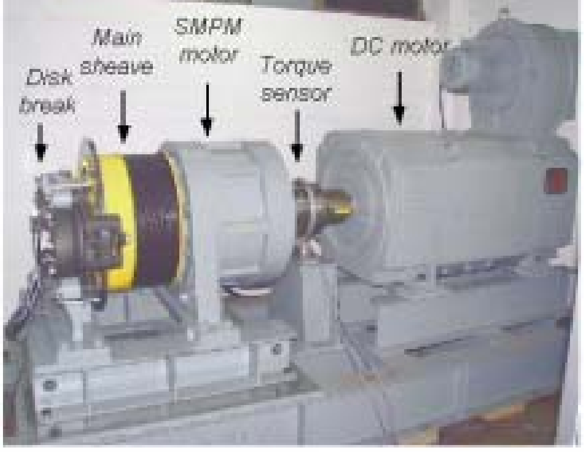

그림 2. 시뮬레이터 시스템의 기계적인 구조.

표 1. 표면부착형 영구자석 동기전동기의 사양.

RATINGS	
Power	40 kW
Torque	1399 nt-m
Speed	273 r/min
Voltage	315 Vrms
Current	88.1 Arms
Efficiency	94.7 %
PF	88.0 %
PARAMETERS	
Pole	24
Rs	0.0681 Ohm
Ls	2.85 mH
Kemf	977.30 Vrms/krpm
Jm	5.01 kg-m^2

치가 모두 회생 운전이 가능하므로 전원측에서의 소비 전력은 시스템의 전기적, 기계적 손실에만 해당한다. 직류 전동기의 인버터는 그림3과 같이 구성되어 있다. 전기자측는 full-bridge를 사용하여 4상한 운전이 가능하고 여자측은 한 개의 bridge중 위쪽 소자는 chopper로 아래쪽 소자는 free-wheeling diode로 사용하였다.

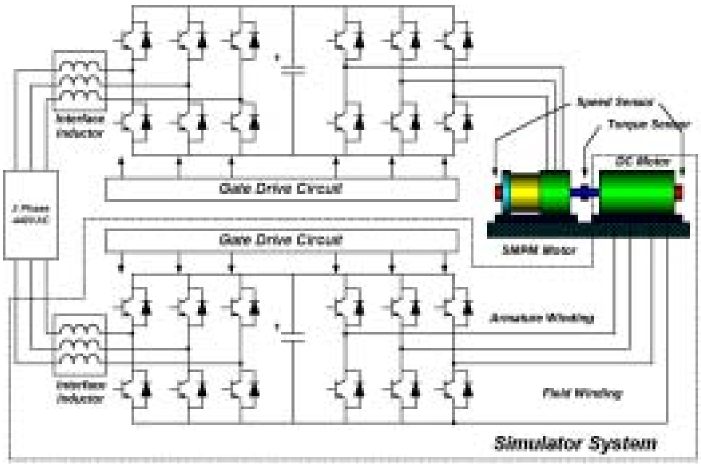

그림 3. 시뮬레이터 시스템의 구성도.

표2는 전체 엘리베이터 시스템과 시뮬레이터 시스템의 관성을 나타내며 그 비가 6배 정도임을 알 수 있다. 따라서 부하측 시뮬레이터(직류 전동기)는 자기 관성의 5배에 해당하는 관성을 전기적으로 구현해야 한다.

표 2. 엘리베이터 및 시뮬레이터 시스템의 관성.

Elevator System	223.6 kg-m^2
Main Sheave	19.6 kg-m^2
Second Sheave	20.0 kg-m^2
Car and Counterweight	184.0 kg-m^2
Simulator System	37.41 kg-m^2
SMPM Motor and Sheave	19.6 kg-m^2
DC Motor	17.7 kg-m^2
Torque Sensor	0.11 kg-m^2

2.3.2 실험 결과

그림4는 등가 1관성계로 구현하였을 때 가속 구간에서의 전동기 속도, 토오크 지령치, 토오크 궤환치, 그리고 가속도의 파형을 나타낸다. 시험 조건은 최대 정원 탑승시 최대 가속도로 최대 속도까지 가속하는 상승 운전에 해당된다. 이 때, 속도 제어기의 응답 주파수는 2.5Hz이고 가속도의 필터 주파수는 100Hz로 속도 제어기의 응답 주파수에 비해 충분히 높게 설정되었다.

그림5는 동일한 조건에서 3관성계로 구현한 경우로 전동기 속도, 토오크 지령치, 토오크 궤환치, 그리고 승강기의 가속도를 나타낸다. 여기서 승강기의 가속도 파형을 통해 실제 승강기에 발생하게 될 종진동을 확인할 수 있다.

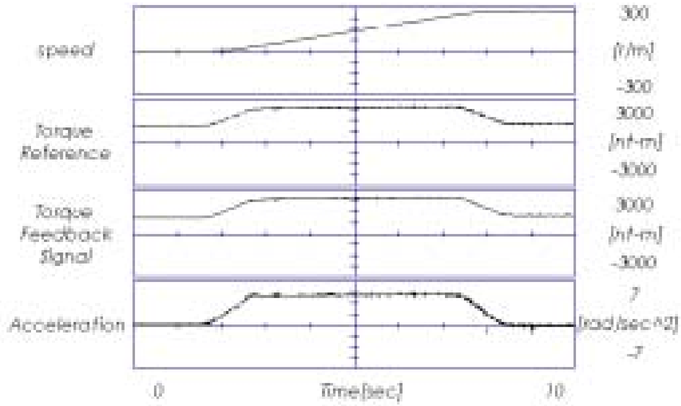

그림 4. 등가 1관성계 시스템의 구현.

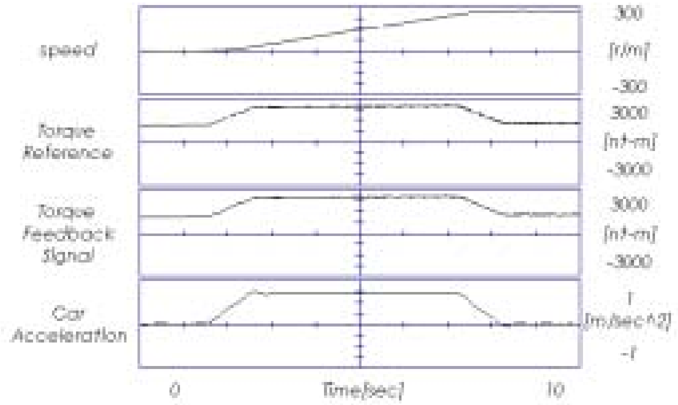

그림 5. 3관성계 시스템의 구현.

3. 결　　론

본 논문은 엘리베이터 시스템의 시뮬레이터 개발에 관한 내용으로 기존의 기계적인 관성체를 사용하는 방식 대신 전기적으로 관성을 구현하는 방식을 사용하였다. 이 방식은 시뮬레이터 시스템을 소형화, 경량화할 수 있으며 다양한 기종을 소프트웨어의 조작만으로 쉽게 구현할 수 있다는 장점을 지닌다. 또한 로프의 유연성을 고려한 실제 엘리베이터 시스템을 구현하기 위해 3관성계 시뮬레이터를 제작하여 실제 승강기에 발생하게 될 종진동을 구현할 수 있음을 실험적으로 보였다. 이 3관성계 시뮬레이터는 승차감 개선을 위한 종진동 억제 알고리즘 개발에 유용하게 쓰일 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Jun-Koo Kang and Seung-Ki Sul, "Vertical vibration control of elevator using estimated car acceleration feedback compensation," *IEEE Trans. IE,* vol.47, pp.91-99, Feb. 2000.

[2] Young-Min Lee, Jun-Koo Kang, and Seung-Ki Sul, "Acceleration feedback control strategy for improving riding quality of elevator system," *IEEE IAS Conf. REC.,* pp.1375-1379, 1999.

[3] Peter B. Schmidt, "Acceleration feedback implemented through the utilization of an observer as applied to a robotic manipulator," 박사 학위 논문, Dep. of Electrical and Computer Engineering, Univ. of Wisconsin-Madison, 1991.

[4] G. P. Hancke and C. F. T. Viljoen, "The microprocessor measurement of low values of rotational speed and acceleration," *IEEE Trans. Instrum. Meas.,* vol.39, pp.1014-1017, Dec. 1990.

[5] Sami Valiviita and Seppo J. Ovaska, "Delayless acceleration measurement method for elevator control," *IEEE Trans. IE,* vol.45, pp.364-366, April 1998.