Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18, No.5, pp. 74~82 September 2004 논문 18-5-11

엘리베이터구동용 영구자석형 동기전동기의 속도 제어

(Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor for Elevator)

유재성 · 김진홍 · 전범수 · 황선모 · 원충연*
(Jae-Sung Yu · Jin-Hong Kim · Bum-Su Jun · Sun-Mo Hwang · Chung-Yuen Won)

요 약

본 논문은 엘리베이터용 표면부착형 영구자석형 동기전동기의 속도제어를 기술하였다. 엘리베이터 전동기는 컴팩트하고 슬립형이 되어야 한다. 제안된 기법은 속도 및 토크제어를 위해 벡터제어 알고리즘을 사용하였으며, 속도제어기와 전류제어기에 windup 현상을 방지하기 위해 Anti-windup 기법을 적용하였다. 이 시스템은 컴팩트하고 저렴하게 설계하기 위하여 고속 32비트 DSP(TMS320C31-50), 고직접 논리소자 FPGA(EPF10K10TI144-3)로 수행되었다. 제안된 기법은 기계실 없는 엘리베이터용 3상 13.3[kW] 표면부착형 동기전동기로 시뮬레이션 및 실험을 통하여 결과를 확인하였다.

Abstract

This paper describes the speed control of the surface-mounted permanent-magent synchronous motors (SMPMSM) for elevator drive. The elevator motor needs to be a compact and slim type. Essentially, the proposed scheme uses a vector control algorithm for a speed and torque control and Anti-windup technique is adopted to prevent a windup phenomenon. This system is implemented using a high speed 32-bit DSP (TMS320C31-50), a high-integrated logic device FPGA(EPF10K10TI144-3) to design compactly and inexpensively. The proposed scheme is verified by the results through digital simulation and experiments for a three-phase 13.3[kW] SMPMSM as a MRL(MachineRoomLess) elevator motor in the laboratory.

Key Words : Surface-mounted permanent-magent synchronous motors(SMPMSM), Vector Control, MRL(MachineRoomLess) elevator motor

1. 서 론

엘리베이터는 건물내의 종측 교통기관으로 중요한 역할을 하고 있다. 기존의 엘리베이터 시스템의 구동원으로는 주로 유도전동기가 사용되고 있다. 그러나 유도 전동기의 특성상 여자전류로 인한 낮은 효율과 토크 부족 때문에 기어를 사용한다. 기어를 사용하므로 기계실의 부피가 커지고 소음이 커지는 문제점이있다. 따라서 엘리베이터를 고효율, 고성능으로 운전하기 위해 영구자석형 동기전동기가 채택된다[1].

* 주저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
Tel : 031-290-7115, Fax : 031-290-7179
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr
접수일자 : 2004년 2월 25일
1차심사 : 2004년 3월 2일, 2차심사 : 2004년 6월 22일
심사완료 : 2004년 7월 5일

MRL(MachineRoomLess) 엘리베이터용 구동부와 제어부는 기계실을 없애기 위해서 각각 소형 및 박형타입으로 제작 되어야 한다.

그러므로 기계실이 차지하던 높이만큼 건물이 낮아져 건축비용을 절감하고, 고도제한의 극복과 건물 하중의 경감, 다양한 건물 지붕선(스카이라인)의 설계를 가능하게 한다는 장점이 있다.

또한 기존의 기어 방식을 무기어식 직접 구동 방식으로 교체하여 에너지 효율을 극대화시킬 수 있다[2].

제어기술의 발달에 의한 제어장치의 간소화와 더불어 고가이던 영구자석의 가격하락에 따라 고출력 대형 동기전동기가 가격 경쟁력을 가지게 되었다.

그리고 동기전동기의 최대 약점이던 자석위치 검출 및 신뢰성 향상 그리고 제어성능의 향상으로 미세속도 제어가 가능하게 되었다.

유도전동기 대신 영구자석형 동기전동기를 적용함으로써 소음과 진동을 획기적으로 줄여 승차감을 높이고, 유압식 엘리베이터처럼 누유 및 폐유가 발생하지 않는 환경친화적인 장점을 가진다.

MRL 엘리베이터의 구동을 위해서는 박형 타입 및 기어가 필요 없는 고효율 영구자석형 동기전동기의 채택이 필수적이다.

이러한 박형 타입 기어리스 영구자석형 동기전동기는 승강로 및 건물의 상층부에 설치되므로 소형이면서 소음이 없어야 한다.

본 논문에서는 정밀한 속도 및 토크제어를 위해 벡터제어 알고리즘을 사용하였다. 이때 제어기의 출력은 시스템의 보호를 위해 리미터에 의해 제한된다.

그러나 제어기의 출력이 리미터에 도달하면 오차신호가 적분되어 적분항이 누적되어 출력신호가 매우 커지게 되고 제어기는 계속 포화상태로 머물게 되어 편차부호를 바꾸는데 많은 시간이 걸린다. 이러한 현상을 windup 현상이라 한다.

Windup 현상의 결과로 제어기가 포화되면 제어기의 과도 상태가 길어지고 응답에 오버슈트가 발생한다. 이러한 현상을 방지하기 위해서 Anti-windup 기법을 사용하였다[3].

본 논문은 엘리베이터를 구동하기 위한 표면부착형 영구자석형 동기전동기의 벡터제어 및 전압분리제어 알고리즘을 사용한 속도제어 시스템을 제안하였다.

2. PMSM의 제어 알고리즘

그림 1은 시스템의 벡터제어 블록도로서 A는 속도제어기이고, B는 전류제어기를 나타낸다.

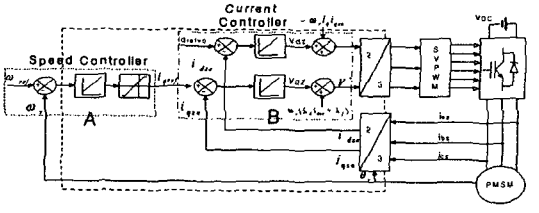


그림 1. 제안된 속도제어 시스템
Fig. 1. The proposed speed control system

전류제어를 위한 전원장치로는 공간전압벡터 PWM 방식을 적용한 전류제어형 PWM 인버터를 사용하여 구현하였다.

전류제어기에서 d축과 q축을 나누어 제어하고, 영구자석형 동기전동기이므로 d축은 0으로 제어를 하였다. 속도제어기의 출력은 토크 지령으로 q축 제어기에 입력된다.

벡터제어 알고리즘은 회전자 자속의 위치를 검출하는 방법에 따라서 직접 벡터제어와 간접 벡터제어로 구분된다.

본 논문에서는 회전자 자속의 위치를 절대 엔코더로 직접 검출하는 직접 벡터제어 알고리즘을 사용하였다. 이 시스템에서는 전류제어기에 적분기의 windup 현상을 제거하는 Anti-windup 기법을 적용하였고, 속도제어기에는 Anti-windup 기법과 오버슈트를 없앨 수 있는 *IP-PI*혼합 제어기를 사용하였다[4].

2.1 전류 제어기 설계

그림2는 전류제어기의 개념도를 나타낸다.

일반적인 전류제어는 전동기로 흐르는 전류를 궤환하고 이를 전류 명령과 비교하여 이에 상응하는 전압을 전동기에 인가한다.

전류제어기의 전달함수는 식(1)과 같다.

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{K_{pc}s + K_{ic}}{L_s s^2 + (R_s + K_{pc})s + K_{ic}} \qquad (1)$$

K_{pc} : 전류제어기 비례이득
K_{ic} : 전류제어기 적분이득
L_s : 고정자 인덕턴스
R_s : 고정자 저항

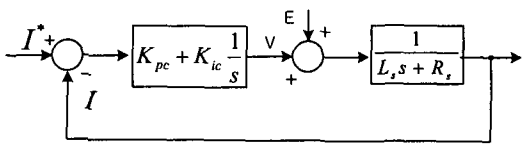


그림 2. 전류제어기 개념도
Fig. 2. Block diagram of current controller

식(1)에서 일반적인 PI 제어기의 시정수인

$$T_c = \frac{K_{pc}}{K_{ic}} \tag{2}$$

를 이용하여 다시 쓰면 식(1)은

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{T_c s+1}{T_c s} \frac{\frac{K_{pc}}{R_s}}{\frac{L_s}{R_s}s+1} \tag{3}$$

이 된다.

이때, 식을 간단히 하기 위하여 제어기의 시정수를 제어 대상 시스템의 시정수와 같게 선정하면 다음과 같이 간단하게 정리된다.

$$\frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{1}{\frac{L_s}{K_{pc}}s} \tag{4}$$

그림 3은 전류제어기의 주파수응답특성을 나타낸다.

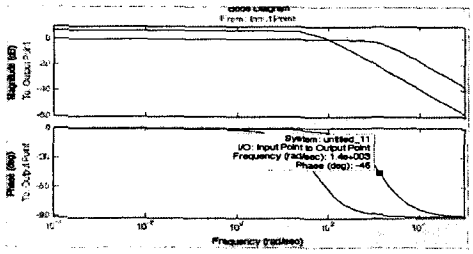


그림 3. 전류제어기의 주파수 응답특성
Fig. 3. Frequency response characteristics of current controller

주파수 응답곡선을 이용한 이득 선정방식을 통해 해석하면 식(4)에 의해 전류제어기의 교차각 주파수는 다음과 같이 주어진다[5].

$$w_{cc} = \frac{K_{pc}}{L_s} \tag{5}$$

교차각 주파수는 이득이 3[dB]로 감소되는 주파수이다. 이상의 해석으로 다음과 같은 전류제어기의 이득을 선정할 수 있다.

$$K_{pc} = L_s w_{cc} \tag{6}$$

$$K_{ic} = \frac{R_s}{L_s}K_{pc} = R_s w_{cc} \tag{7}$$

교차각 주파수를 크게 하는 것은 전류제어기의 성능을 올리는 효과가 있으나, 너무 크게 선정하게 되면 신호의 잡음, 전달 지연 등의 이유로 인하여 시스템의 발산을 초래할 가능성이 커진다.

특히 디지털 제어 시스템에서는 전류 제어기의 샘플링 주기에 의해 교차각 주파수의 제한이 따른다.

실험적으로 100[㎲]의 샘플링 주기를 갖는 시스템에서는 교차각 주파수를 샘플링 주기의 1/10인 6000[rad/sec]정도까지 선정할 수 있다.

본 논문에서는 전류제어기의 샘플링 주기가 300[㎲]이므로 교차각 주파수가 스위칭 주파수 3.33[kHz]의 1/15이 되도록 w_{cc}=1396[rad/sec]로 설정하였고 이 때 K_{pc}= 12.0754, K_{ic}= 650.536이 된다.

전류제어기의 출력은 시스템의 보호를 위해 리미터에 의해 제한된다.

그림 4는 Anti-windup 기법을 적용한 PI 전류제어기로서 그림1의 B 부분을 자세하게 나타내었다[6].

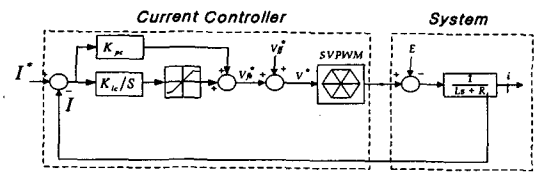


그림 4. Anti-Windup 기법을 가진PI 제어기 블록도
Fig. 4. Block diagram of PI controller with Anti-windup technique

전류제어기는 전류오차와 전류에 대한 궤환 성분과 역기전력 보상을 위한 전향 성분으로 구성되어 있다.

$$V^* = V_{fb}^* + V_{ff}^* \tag{8}$$

일반적인 전류제어기의 경우 제어기 출력에 리미터를 따로 사용하지만 SVPWM에서 스위칭 시간의 제한을 두어 리미터를 대신한다.

제어신호의 출력이 SVPWM에 의해 제한되면 windup 현상이 발생하게 되며 이로 인해 응답의 지연과 오버슈트가 발생한다. 따라서 이를 방지하는 Anti-windup 기법을 사용하였다.

본 논문에서는 PI제어기의 적분기의 출력에 리미터를 두어 windup현상을 방지하였다.

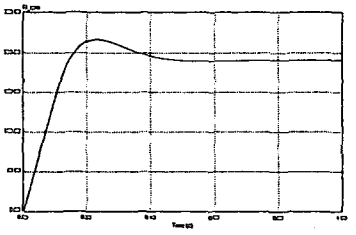


그림 5. windup 현상이 발생한 속도응답파형
Fig. 5. Waveform of speed response with wnidup phenomenon

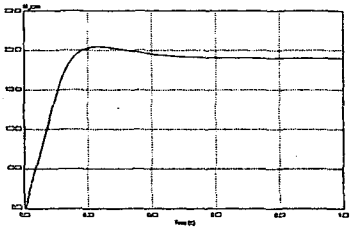


그림 6. Anti-windup기법을 적용한 속도응답파형
Fig. 6. Waveform of speed response using Anti-windup technique

그림 5는 windup 현상이 발생한 속도응답파형을 나타낸다. 약 0.18초 지점부터 응답에 오버슈트가 발생한 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 Anti-windup 기법을 사용한 속도응답파형이다. 그림 5와 비교했을때 오버슈트가 감소한 것을 확인할 수 있다.

2.2 속도 제어기 설계

본 논문에서는 오버슈트 없는 최적의 속도제어기를 위하여 2자유도를 갖는 PI/IP 혼합제어기를 적용하고, 적분기의 windup 현상을 방지하기 위해 적분기에 리미터를 추가하였다.

그림 7은 전류제어기의 이득을 1로 단순화한 속도제어기의 블록도이다.

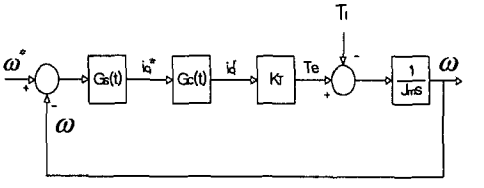


그림 7. 전류제어계를 단순화한 속도제어계 블록도
Fig. 7. Block diagram of speed controller simplified current controller

식 (9)는 속도제어기의 개루프 전달함수를 나타낸다[5].

$$\frac{w^*(s)}{w(s)} = \left(K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}\right)\frac{K_T}{J_m s} \tag{9}$$

K_{ps} : 속도제어기 비례이득

K_{is} : 속도제어기 전류이득

K_T : 전동기 토크상수

J_m : 관성모멘트

식 (9)를 이용하여 전달함수의 주파수 특성을 표현하면 그림 8과 같게 된다.

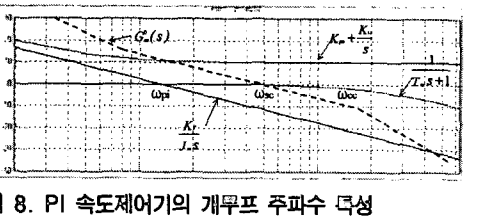


그림 8. PI 속도제어기의 개루프 주파수 특성
Fig. 8. Open loop frequency characteristics of PI speed controller

w_{sc}부근에서 전류 제어기의 이득이 1이라고 하면 PI 절점주파수(cut-off frequency) w_{pi}는

$$w_{pi} = \frac{K_{is}}{K_{ps}} \tag{10}$$

인데 w_{sc} 의 수분의 1 이하인 경우에는 각 주파수 w_{sc}부근에서

$$\frac{w^*(s)}{w(s)} \approx K_{ps} \tag{11}$$

로 근사화 된다. 그러므로 PI속도제어계의 개루프 전달함수는 각주파수 ω_{sc}부근에서는

$$G_{sc}^{o}(s) \approx K_{ps}\frac{K_T}{J_m s} \tag{12}$$

로 근사화 되는 것을 알 수 있다. 그러므로 전달함수의 이득이 1 이 되도록 비례이득K_{ps} 값을 구하면 된다. 즉

$$K_{ps} = \frac{J_m w_{sc}}{K_T} \tag{13}$$

로 하면 된다. 또, 적분 이득K_{is} 값은 보통 PI절점주파수w_{pi} 가

$$w_{pi} \leq \frac{w_{sc}}{5} \tag{14}$$

가 되도록 다음과 같이 구한다.

$$K_{is} = K_{ps} w_{pi} \cong K_{ps}\frac{w_{sc}}{5} \tag{15}$$

본 논문에서는 교차각주파수 w_{sc}=94.25[rad/sec]로 하였으며, PI 절점 각주파수 w_{pi}=18.85[rad/sec](=w_{sc}/5)로 설정하였다.

제어기의 이득은 식 (13)와 (15)에 의해 K_{ps}= 1,11.24, K_{is}=2096.9 가 된다.

그림 9는 속도제어기 블록도를 나타내며 그림1의 A부분을 자세하게 나타내었다.

위에서 설계한것과 같은 PI 속도제어기는 정상상태 동작은 우수하지만 속도 지령의 급격한 변화에 대하여 전동기 속도의 오버슈트가 나타난다.

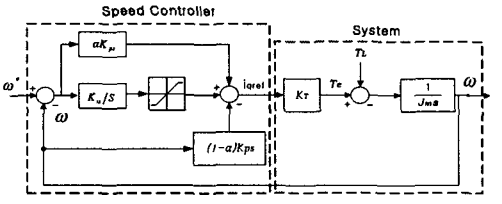


그림 9. 속도 제어기 블록도
Fig. 9. Block diagram of speed controller

따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 2자유도 PI/IP 제어기를 사용한다.

그림에서 α 값을 1로 하면 PI 속도제어기에 해당하고 α 값을 0으로 하면 IP 속도제어기에 해당한다.

이와 같은 속도 제어계를 대상으로 속도 기준값과 부하 토오크에 대한 속도 응답성을 전달함수로 표시하면 각각 식 (16), (17)과 같다.

$$\frac{w(s)}{w^*(s)} = \frac{K_T(\alpha K_{ps} s + K_{is})}{J_m s^2 + K_T K_{ps} s + K_T K_{is}} \tag{16}$$

$$\frac{w(s)}{T_S(s)} = \frac{s}{J_m s^2 + K_T K_{ps} s + K_T K_{is}} \tag{17}$$

전달함수를 통해 부하토크 Ts에 대한 w의 응답특성은 Kps와 Kis를 결정하면 고정되지만 속도지령 w^* 에 대한 w의 응답특성은 α 값을 통해 조절가능하다는 것을 알 수 있다.

따라서 PI/IP 제어기의 계수인 α 값을 조정함으로써 응답이 빠르고 오버슈트 없는 제어기를 설계할 수 있다.

3. 시스템 구성

그림 10은 실험 시스템 및 제어부 구성도를 나타

낸다. 모터 MG세트와 인버터 그리고 제어보드로 구성되어 있는 것을 볼 수 있다.

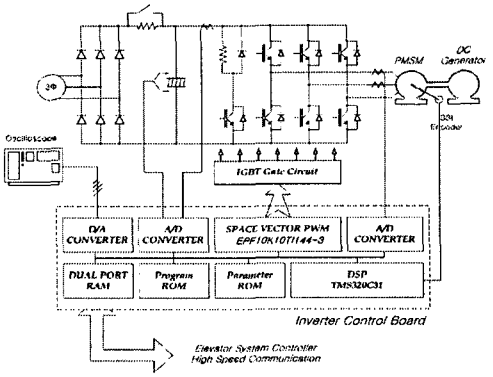


그림 10. 실험 시스템 및 제어부 구성도
Fig. 10. Experimental system and control configuration block diagram

엔코더와 제어보드간의 통신 방법은 ASIC화한 전용의 IC가 있으나 비용을 고려하여 FPGA에 클럭 발생부, 데이타수신부 및 수신한 그레이 코드를 바이너리 코드로 변환해 주는 로직을 설계하였다.

노이즈에 강하고 장거리 전송할 수 있는 MAX485 통신 IC를 사용하였다.

시스템 제어보드는 부동 소수점을 처리할 수 있는 TI사의 고성능 DSP인 TMS320C31-50을 채택하였다.

TMS320C31-50과 엘리베이터 주보드와의 통신을 위하여 IDT사의 2[K]*8[bit] RAM(IDT7132SA/LA), 외부와 직렬통신을 위한 ZILOG사의 Z85230을 사용하였다.

또한 전류검출과 DC링크단 전압을 검출하기 위해 ANALOG DEVICE사의 동시에 2채널을 변환할 수 있는 AD7862를 내부변수 모니터링을 위해서 AD664 D/A 컨버터를 사용하였다.

엘리베이터 설치시 스위칭 소음을 조절할 수 있도록 자동으로 스위칭 주파수를 변경할 수 있는 로직을 설계하여 ALTERA사의 고집적 FPGA인 EPF10K10TI144-3에 프로그램 하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 시뮬레이션

엘리베이터구동용 영구자석형 동기전동기의 속도제어가 완전하게 되는 것을 확인하기 위해서 시뮬레이션을 하였다.

제어보드의 벡터제어 알고리즘을 C언어로 구현하기 때문에 C언어 구현에 용이한 PSIM6.0을 이용하였다. PSIM의 DLL파일을 이용하여 실험에서 사용한 프로그램과 동일한 C로 알고리즘을 구현하였다.

시뮬레이션에 사용한 영구자석형 동기전동기의 사양은 표 1과 같다.

실험과 동일하게 하기 위해서 전류제어기는 150 [㎲]로 설정하였고 속도제어기는 2[㎳]로 설정하였다.

영구자석형 동기 전동기의 속도제어 성능을 검증하기 위해서 스텝 입력 응답과 램프입력 응답 특성을 확인하였다. 그림 11은 시뮬레이션 회로도를 보여준다.

그림에서 두개의 DLL블록을 볼 수 있는데 A부분이 벡터제어를 구현한 DLL블록이고, B부분이 SVPWM을 구현한 DLL블록이다.

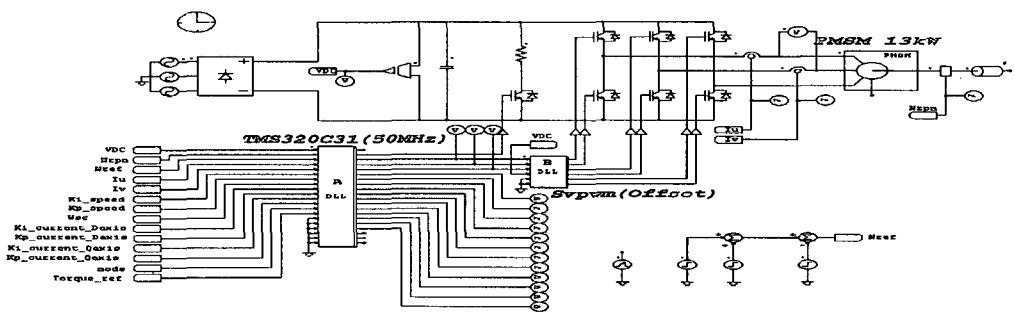


그림 11. 시뮬레이션 회로도
Fig. 11. simulation schematic

표 1. 13.3[kW] SMPMSM 사양
Table 1. Specification of 13.3[kW] SMPMSM

파 라 미 터	정 격
Rated Power	13.3 [kW]
Torque	670 [Nm]
Speed	190 [rpm]
Current	27.2 [A]
Efficiency	87 [%]
Frequency	38 [Hz]
Pole	24 극
Rs	0.466 [Ω]
Ls	8.65 [mH]
Ke	2135 [Vpk/krpm]
Jm	2.8 [Kg-m^2]

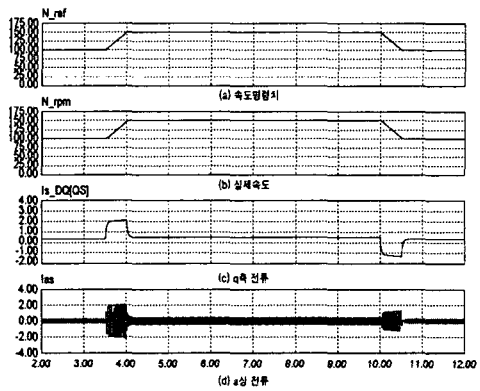


그림 12. 속도응답특성(무부하)
(기준속도 : 100→150→100[rpm])
Fig. 12. Speed response characterisitics for no load
(Reference speed : 100→150→100[rpm])

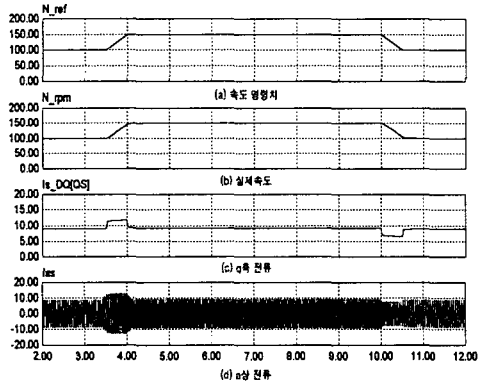


그림 13. 속도응답특성(20[%]부하)
(기준속도 : 100→150→100[rpm])
Fig. 13. Speed response characteristics for 20[%] load
(Reference speed : 100→150→100[rpm])

그림 12와 13은 램프로 기준속도를 인가한 경우의 결과 파형이다. 속도는 정격의 약 80[%]인 150[rpm]까지 인가하였다. 그림12는 무부하시 그림 13은 정격의 20[%]까지 부하를 인가했을 경우의 시뮬레이션 결과파형이다.

4.2 실험결과

실험대상 영구자석형 동기전동기는 13.3[kW]로써 최대 탑승인원은 17명이고 20층 내외의 MRL엘리베이터에 사용되며, 최대 토크는 670[Nm]이고, 정격 속도는 190[rpm]이다.

영구자석형 동기전동기를 구동하기 위해서는 초기회전자 위치 및 운전 중 에도 정확한 회전자 위치를 검출해야한다.

본 논문에서는 전기각을 0.5도의 분해능으로 검출이 가능한 Heidenhain사의 ECN-1313 모델을 사용하였다.

그림 14의 (a)는 실험에 사용된 영구자석형 동기전동기와 부하로 사용된 DC 발전기의 외관이고 (b)는 회전자의 속도와 위치를 검출하는 절대엔코더를 보여준다.

영구자석형 동기전동기의 속도제어를 검증하기 위해서 시뮬레이션과 동일한 조건으로 정격의 80[%]속도와 20[%]의 부하를 인가하여 시험하였다.

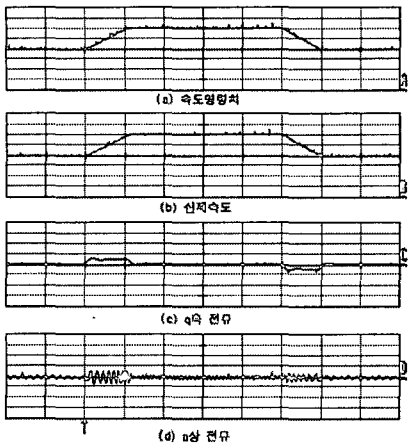
(a) 영구자석형 동기전동기 (b) 절대엔코더(ECN1313)

그림 14. 실험용 MG 장치
Fig. 14. Experimental MG setup

그림 15는 무부하시의 램프 입력시 응답 특성을, 그림 16은 정격의 20[%] 부하를 인가했을 때의 응답 특성을 보여준다.

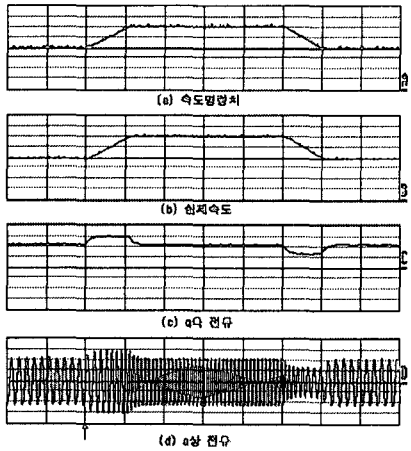
시뮬레이션과 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 구동시스템의 성능을 확인하였다.

무부하실험 경우 100[rpm]에서 150[rpm]으로 속도증가시 속도지령치를 정확하게 추종하였으며, q축



(x축 : 0.5[sec/div], y축 : 25[rpm/div], 4[A/div])

그림 15. 속도응답특성 (무부하)
(기준속도 : 100→150→100[rpm])
Fig. 15. Speed response characteristics for no load
(Reference speed : 100→150→100[rpm])



(x축 : 0.5[sec/div], y축 : 25[rpm/div], 4[A/div])

그림 16. 속도응답특성 (20[%]부하)
(기준속도 : 100→150→100[rpm])
Fig. 16. Speed response characteristics for 20[%] load
(Reference speed : 100→150→100[rpm])

전류와 a상전류는 속도증가구간에서 약 2[A]정도로 시뮬레이션과 실험결과가 일치하였다.

부하실험에서도 100[rpm]에서 150[rpm]으로 속도 증가시 시뮬레이션과 실험 모두 속도지령치를 정확하게 따라감을 확인하였다.

q축전류와 a상전류는 속도증가구간에서 약 12[A], 정상상태구간에서는 약 8[A]정도로 시뮬레이션과 실험결과가 일치한다.

5. 결 론

본 논문에서는 제안한 MRL 엘리베이터에 사용되는 PMSM 속도제어 시스템을 시뮬레이션과 실험을 통하여 성능을 확인하였다.

1) 벡터제어 알고리즘을 사용하여 정밀한 토크제어와 속도제어가 가능하게 하였으며, 전류제어기에 Anti-windup 기법을 이용하여 적분기의 windup 현상으로 인한 응답의 지연과 오버슈트를 저감하였다.

2) 속도제어기는 2자유도를 갖는 PI/IP 혼합제어기에 Anti-windup 기법을 적용하여 과도상태와 정상상태동작 특성이 우수하였다.

3) 제안된 시스템을 13.3[kW]용량의 MRL 엘리베이터 구동용 영구자석 동기전동기에 적용하고 이에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행한 결과, 속도 및 부하 부하응답에 대한 특성이 우수함을 확인하였다.

본 논문의 연구결과는 영구자석형 동기전동기에 의한 기술확보로 주차설비, 에스컬레이터, 엘리베이터, 물류설비, 산업용 기계등에 사용하면 전력소모의 경감효과를 얻을 수 있다.

앞으로 부하에 대한 저속도에서의 속도 및 토크 특성 향상에 대한 연구와 승차감을 좋게 하는 착상 알고리즘 및 종진동 억제 알고리즘이 필요하다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

References

[1] D.W. Chung, H. M. Ryu, Y. M. Lee, S. K. Sul, S.J. Kang, J. H. Song, J. Y. Yoon, K. H. Lee, J. H. Seo, "A new configuration of drive system for high speed gearless elevator", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE , Vol.1, pp.307-310, 3-7 Oct. 1999.

[2] N. Mutoh, N. Ohnuma, A. Omiya, and M. Konya, "A Motor Driving Controller Suitable for Elevators", IEEE

Trans. On Power Electron, Vol. 13, no.6, pp.1123-1134, Nov, 1998.
[3] Hwi-Beom Shin, "New Anti-windup PI Controller for Variable Speed Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Applications. Vol.45, No. 3. pp.445-450, June 1998.
[4] (주)첨단, "모터 드라이브 & 제어의 최신기술동향 - 엘리베이터용 모터의 박형화 기술", 월간 전자기술 2002, 11월.
[5] 小山正人, 主井伸三, AC 서보시스템의 이론과 설계의 실제, 대영사, 1999.
[6] Tan Kok Kiong, Wang Qing-Guo, Hang Chang Chieh, Advances in PID Control, Springer, 1999.

◇ 저자소개 ◇

유재성 (柳在成)
1975년 9월 2일생. 2002년 2월 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2004년 2월 성균관대학교 대학원 에너지 시스템공학과 졸업(석사). 현재 성균관대학교 대학원 에너지 시스템공학과 박사과정.

김진홍 (金晋弘)
1976년 1월 20일생. 2001년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 졸업. 2003년 2월 성균관대학교 대학원 졸업(석사). 현재 LG산전 자동화연구소 근무.

전범수 (田凡洙)
1977년 12월 25일생. 2002년 2월 순천향대학교 제어계측 공학과 졸업. 2004년 2월 성균관대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 신성 ENG 근무.

황선모 (黃善謨)
1977년 10월 20일생. 2003년 성균관대학교 정보통신공학부 졸업. 현재 성균관대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정.

원충연 (元忠淵)
1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터 공학과 교수. 본 학회 편수위원.