

영구자석 동기전동기의 회전자 초기위치 검출 및 엘리베이터 도어의 속도제어

송기영¹, 오현철¹, 조관열[†], 김학원¹

Initial Rotor Position Detection a PM Synchronous Motor and Speed Control of an Elevator Door

Ki-Young Song¹, Hyun-Cheal Oh¹, Kwan-Yuhl Cho[†], and Hag-Wone Kim¹

Abstract - This paper proposes an initial rotor position detecting algorithm of a PM synchronous motor using an incremental encoder. The proposed algorithm estimates the phase offset between the rotor magnetic flux and the Z-pulse of the incremental encoder by applying six aligning mode current control. The absolute rotor position for driving a PM synchronous motor is calculated by using the phase offset of the Z pulse and A, B pulse signals of the encoder. The PMSM drives based on the estimated rotor position is applied to the elevator door system. The door length is measured on line at first setup of the elevator. The speed control for open, close, and reopen of the elevator door is also presented and the proposed algorithm for the elevator door system is verified by experiment.

Keywords: PMSM, elevator door, incremental encoder, rotor position, reopen

1. 서 론

엘리베이터 도어는 아파트, 사무실 또는 병원 등의 설치환경에 따라 도어의 폭 및 속도제어 패턴이 다르게 나타난다. 따라서 엘리베이터 도어의 설치환경이 바뀔 때마다 도어의 속도제어 패턴과 제어 파라미터를 수정 또는 튜닝(Tuning)해야 하는 문제점이 있다.^{[1], [2]} 본 논문에서는 이러한 설치 환경이 변경함에 따라 현장에서 튜닝작업을 최소화 할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

기존의 엘리베이터 도어의 속도제어를 위해 유도전동기를 사용하고 있다. 그러나 최근 전동기의 효율 향상 및 속도제어 특성이 좋은 영구자석 동기전동기의 적용이 점차 확대되고 있다. 영구자석 동기전동기의 속도제어를 위해서는 영구자석 동기전동기의 회전자 위치검출을 위해 레졸버(Resolver) 또는 절대형 엔코더(Absolute encoder)를 사용하는 것이 일반적이다.

최근 회전자 위치검출 센서의 재료비를 저감하기 위하여 회전자의 절대위치 검출을 위한 홀센서(Hall sensor)와 높은 속도 분해능을 갖는 증분형 엔코더(Incremental encoder)를 조합하여 회전자의 절대위치를 검출하는 방법이 MDPS(Motor driven power steering) 등의 일부 응용분야에 적용되고 있다.^[3] 전기각 90도의 절대위치 정보를 갖는 홀센서만 사용하여 영구자석 동기전동기의 진류를 정현파로 제어할 수 있는 알고리즘도 제안되고 있으나 이러한 방법은 가감속 구간 또는 부하가 급격히 변할 때에 위치정보의 오차가 증가한다.

본 논문에서는 홀센서를 사용하지 않고 증분형 엔코더만을 사용하여 회전자의 절대위치를 검출할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 증분형 엔코더를 사용하여 영구자석 동기전동기를 구동하기 위해서는 회전자의 초기위치 추정이 반드시 필요하다.^{[4][5]} 증분형 엔코더(Incremental encoder)의 경우 회전자 1회전 당 한 번의 신호를 발생하는 Z 펄스를 회전자의 초기위치를 검출하기 위한 기준신호로 사용할 수 있다.^{[5][7]} 그러나 엔코더의 Z 펄스 신호를 회전자의 영구자석의 절대위치에 맞추는 작업은 대량생산 등을 고려할 때 현실적으로 어렵다. 따라서 본 논문에서는 전동기에 임의로 취부된 증분형 엔코더의 Z 펄스 신호로부터 회전자의 초기 절대위치를 검출하기 위한 알고리즘을 제안한다.

Paper number: TKPE-2013-18-6-7

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: kycho@ut.ac.kr, Dept. of Control & Instrumentation Eng., Korea University of Transportation
Tel: +82-43-841-5329 Fax: +82-43-841-5320

¹ Dept. of Control & Instrumentation Eng., Korea University of Transportation

Manuscript received Jul. 25, 2013; accepted Oct. 11, 2013

본 논문에서 제안된 엘리베이터 도어용 영구자석 동기전동기의 속도제어 패턴 및 증분형 엔코더의 초기 위치 검출 알고리즘의 특성을 실험으로 검증한다.

2. 엘리베이터 도어의 속도제어 알고리즘

2.1 엘리베이터 도어시스템

그림 1은 엘리베이터 도어시스템의 구조를 나타낸다. 엘리베이터 구동용 영구자석 동기전동기는 풀리(Pulley) P_1 및 P_2 를 통하여 고무벨트로 엘리베이터 도어와 연결된다. 영구자석 동기전동기의 회전방향에 따라 엘리베이터 도어는 열림(Open), 닫힘(Close) 및 재열림(Reopen) 등의 모드로 동작된다.

전동기 제어기는 엘리베이터 오른쪽 도어의 양쪽 끝부분에 위치한 CLS(Close Limit Switch) 와 OLS(Open Limit Switch) 신호로부터 도어의 완전 열림 또는 완전 닫힘의 상태를 판단하여 도어의 속도를 제어하며 상위 제어기에 도어의 현재 위치 정보를 전달한다. 엘리베이터 도어의 열림, 닫힘 동작을 위한 전동기의 회전 각속도와 도어의 선속도와와의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\omega_r = \frac{R_{p2}}{R_{p1}} v_d = \beta v_d \quad (1)$$

여기에서 R_{p1} , R_{p2} 은 각각 전동기에 부착된 풀리 P_1 및 P_2 의 반지름을 나타낸다. 식 (1)에서 환산계수 β 는 전동기의 회전 각속도와 도어 선속도의 비를 나타내며 이 환산계수를 통하여 도어의 이동거리와 전동기의 회전각도의 관계를 계산할 수 있다.

2.2 속도패턴의 구성

그림 2는 엘리베이터 도어가 열림 모드로 동작할 때 도어의 속도패턴을 나타낸다. 도어의 열림 시 도어는 CLS 센서가 감지되기 이전까지의 t_0 까지는 임의의 낮은

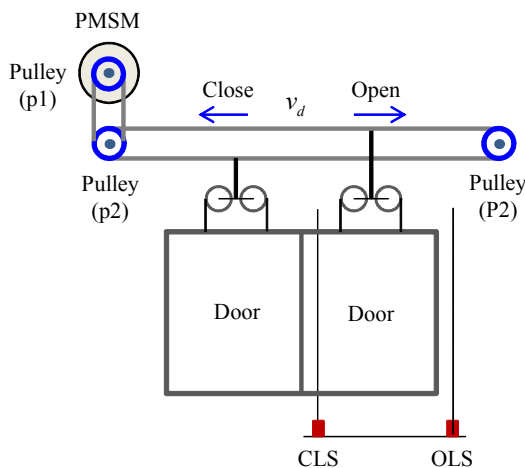


Fig. 1 Structure of elevator door system

속도인 크립속도(Creep speed) v_o 로 운전되고, CLS 신호가 감지되면 가속, 정속운전 및 감속을 하며 감속 시 속도가 크립속도에 도달하는 t_3 이후부터는 크립속도로 운전된다. OLS 신호는 전동기의 속도제어 특성에 따라 t_3 이전 또는 이후부터 도어가 완전히 열리는 t_4 사이의 임의의 시간에서 감지된다. 도어의 닫힘(Close) 시 구동패턴은 열림(Open) 시의 구동패턴과 반대로 운전된다.

그림 2의 속도 패턴에서 도어의 제어거리(L_o)는 도어의 전체 길이에서 크립속도로 운전되는 구간을 제외한 거리로 정의되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_o = \int_{t_0}^{t_3} v_d dt \quad (2)$$

여기서 v_d 는 도어의 이동속도를 나타낸다. 도어의 제어거리(L_o)와 구동시간($t_s = t_3 - t_0$)은 엘리베이터의 설치 환경에 따라 달라진다. 도어의 크기에 따라 열림 및 닫힘에 요구되는 표준시간은 다르게 나타나며 도어의 길이가 커짐에 따라 표준시간도 증가한다. 본 연구에서 사용된 엘리베이터 도어는 도어가 좌우 양쪽으로 열리는 중앙 열림(Center open) 방식으로 제어거리 L_o 는 400mm, 표준 구동시간은 2.2초이다.

엘리베이터 도어의 제어거리(L_o)와 표준 구동시간(t_s)이 정해지면 가속, 정속 및 감속의 속도패턴을 결정한다. 속도패턴은 가속 시 각가속도(α_a)와 감속 시 각가속도(α_d)로부터 결정하는 방법과 정속구간에서의 속도(v_c)로부터 결정하는 두 가지 방법을 생각할 수 있다. 본 연구에서는 가속 및 감속 기울기로부터 속도패턴을 결정하는 방법을 사용하며 이 경우 정속구간에서의 속도는 가속 및 감속 기울기, 제어거리 및 구동시간에 의해 결정된다.

크립속도 운전구간을 제외한 운전영역에서 가속 시 각가속도(α_a)와 감속 시 각가속도(α_d)를 동일하게 설정할 경우 가속 시간($t_a = t_1 - t_0$)과 감속시간($t_d = t_3 - t_2$)은 동일하며 이 경우 가속시간(t_a), 정속운전 시간($t_c = t_2 - t_1$) 및 제어거리(L_o)의 구동시간(t_s)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

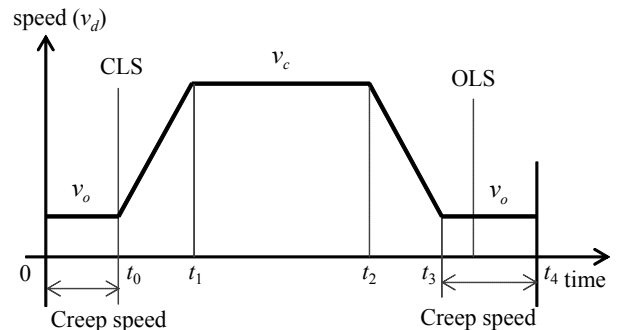


Fig. 2 Speed pattern at open mode

$$t_a = t_1 - t_0 = t_3 - t_2 \tag{3}$$

$$t_c = t_2 - t_1 \tag{4}$$

$$t_s = t_3 - t_0 = 2t_a + t_c \tag{5}$$

여기서 t_s 는 도어가 제어거리 L_o 를 이동하는 표준시간으로 설치자가 결정한다. 도어의 구동시간 t_s 는 크립 속도로 운전하는 구간을 제외한 $t_0 \sim t_3$ 구간이며 제어거리 계산의 편의를 위해 t_0 는 0(Zero)으로 하였다. 따라서 가속시간(t_a)는 t_1 이 되며 이 경우 정속운전 구간에서의 도어속도는 다음과 같이 주어진다.

$$v_c = v_o + \alpha t_a = v_o + \alpha t_1 \tag{6}$$

또한 그림 2에서 크립속도로 운전되는 구간을 제외한 제어거리(L_o)는 식 (2), (4), (5), (6)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_o &= 2 \int_0^{t_1} (\alpha t + v_o) dt + \int_{t_1}^{t_2} v_c dt \\ &= \alpha t_1^2 + 2v_o t_1 + (\alpha t_1 + v_o) t_c \\ &= -\alpha t_1^2 + \alpha t_s t_1 + v_o t_s \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)로부터 가속구간의 시간 t_a 및 정속운전 구간의 시간 t_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_a = t_1 = \frac{\alpha t_s - \sqrt{(\alpha t_s)^2 - 4\alpha(L_o - v_o t_s)}}{2\alpha} \tag{8}$$

$$t_c = t_2 - t_1 = t_s - 2t_a \tag{9}$$

따라서 제어거리(L_o), 구동시간(t_s), 가속 및 감속 기울기(α)가 주어지면 식 (6), (8) 및 (9)로부터 가속, 감속 및 정속운전 시간 및 정속운전 속도를 결정할 수 있다.

2.3 재열림(Reopen) 패턴

엘리베이터 도어의 재열림(Reopen)은 엘리베이터 도어가 닫히는 도중에 사람이나 물체에 의해서 방해받을 경우 도어를 다시 여는 동작이다. 도어의 재열림은 탑승자의 안전과 관계가 있기 때문에 엘리베이터 도어의 중요한 제어 요소이다.

엘리베이터의 상위제어기에서 도어의 재열림 명령이 전동기 제어기에 인가되면 전동기 제어기는 빠른 시간 내에 도어를 정지시킨 후 도어를 완전히 개방해야 한다. 도어의 재열림 조건이 발생한 후 닫히고 있는 도어가 빠른 시간 내에 정지할지 못할 경우 탑승자는 도어에 의해 충격을 받거나 양 쪽 도어에 끼는 현상이 발생할

수 있다. 따라서 닫히고 있는 도어를 빠른 시간 내에 정지시키기 위하여 본 논문에서는 전동기에 역토크를 가하여 제동 (Braking) 모드로 운전함으로써 탑승자가 도어에 의해 밀리는 현상을 최소화하였다.

엘리베이터 도어의 재열림 동작에서 도어가 정지한 후 도어를 다시 완전히 열기 위해서는 현재 도어의 위치로부터 완전 개방까지의 거리에 따라 새로운 속도제어 패턴을 발생해야 한다. 영구자석 동기전동기를 사용한 엘리베이터 도어의 경우 영구자석 동기전동기의 회전자 위치 정보로부터 현재 도어의 위치를 알 수 있으므로 도어의 완전 개방을 위한 도어의 제어거리를 계산할 수 있다. 도어의 재열림 시 속도제어 패턴은 도어의 열림(Open) 동작과 유사하게 속도패턴을 결정한다.

그림 3은 도어가 닫히고 있는 중간에 재열림 신호가 들어온 경우 도어의 정지 및 정지 위치로부터 도어가 완전 개방될 때 까지의 속도 패턴을 나타낸다. 도어의 재열림 시 속도제어 패턴은 도어의 정지시점부터 열림 패턴과 동일한 기울기와 정속도 v_c 로 설정된다. 도어가 거의 닫힌 위치에서의 도어의 재열림 시간은 길게 나타나고 도어가 닫히기 시작하는 시점에서 재열림이 발생할 경우 도어의 재열림 시간은 짧게 나타난다.

3. 영구자석동기전동기의 회전자 위치추정

본 논문에서는 엘리베이터 도어를 구동하기 위한 영구자석 동기전동기의 회전자 위치검출 센서로 증분형 엔코더를 사용한다. 증분형 엔코더는 전동기 회전자 내에 삽입되어 있는 영구자석의 자극의 절대위치 정보를 알 수 없다. 따라서 회전자 영구자석의 자극의 절대위치를 검출하기 위한 방법이 필요하다.

증분형 엔코더의 경우 높은 분해능을 갖는 두 개의 펄스신호(A, B 신호)와 기계각 1회전 당 한 번 발생하는 Z 펄스 신호를 갖는다. 따라서 Z 펄스 신호를 회전자의 절대위치를 검출하기 위한 기준신호로 이용할 수 있다.

그림 4는 증분형 엔코더의 Z 펄스가 영구자석 동기전동기의 회전자의 자극 위치에 일치하도록 부착할 경우 a상의 역기전력(Back emf, e_a), 회전자 영구자석에 의한

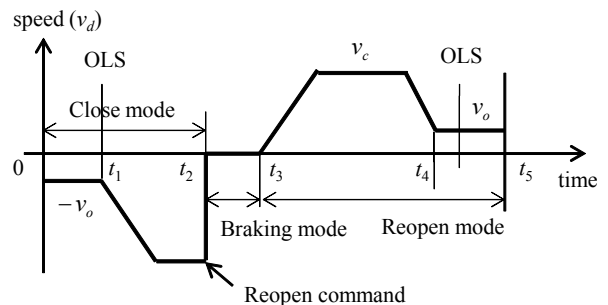


Fig. 3 Speed profile for reopen operation

고정자 a상 쇠교자속(Flux linkage, ψ_{fa}), a상 전류(i_a), 회전자 전기각(θ_r) 및 엔코더의 Z 펄스를 나타낸다. 또한 그림 5는 엔코더의 Z 펄스가 회전자의 자극 위치와 일치되지 않고 일정 각도(θ_{offset})가 어긋나 있을 경우의 신호를 나타낸다.

만약 그림 4와 같이 Z 펄스와 회전자의 절대위치(θ_r)가 같다면 Z 펄스의 옵셋각 θ_{offset} 은 0도로 나타난다. 그러나 그림 5와 같이 엔코더 Z 펄스의 회전자 절대위치가 영(Zero)인 일치하지 않을 경우 Z 펄스를 기준위치로 하여 검출되는 엔코더 위치각(θ_{enc})은 회전자의 절대위치(θ_r)과 Z 펄스의 옵셋각 θ_{offset} 만큼 오차가 발생한다.

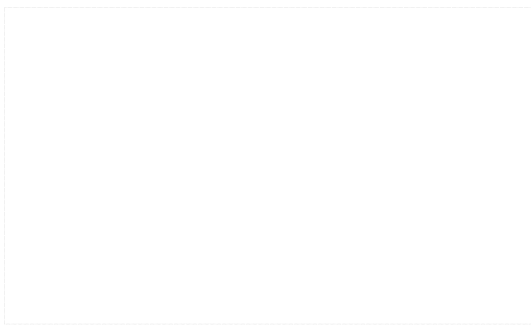
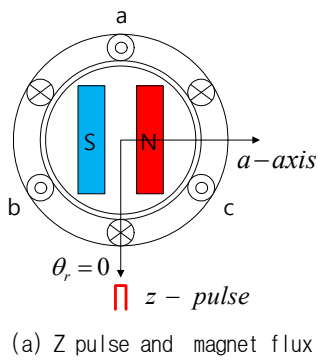
그림 4에 나타난 바와 같이 엔코더의 Z 펄스 신호가 회전자 영구자석의 자속방향과 일치할 경우 Z 펄스 신호는 회전자 절대위치가 영(Zero)인 위치를 나타낸다. 이 경우 Z 펄스 신호로부터 엔코더의 A, B 신호를 계수(Counting)함으로써 분해능이 높은 회전자의 절대위치를 알 수 있다. 그러나 엔코더의 Z 펄스 신호를 기계적으로 회전자의 자극과 일치시키는 작업은 많은 시간과 정밀작업이 필요하게 되므로 대량생산의 경우 적용하기 어렵다.

그림 5와 같이 엔코더의 Z 펄스 신호가 회전자의 자극 위치와 일정 각도(θ_{offset}) 만큼 틀어져 있는 경우 회전자 자극의 절대위치가 영(Zero)인 시점과 엔코더의 Z 펄스 신호는 θ_{offset} 만큼의 차이를 갖게 된다. 엔코더

Z 펄스의 옵셋각(θ_{offset})은 회전자의 회전방향과 같이 반시계 방향의 각을 양(Positive)의 각으로 정의한다. 엔코더 Z 펄스의 초기 위치는 엔코더를 전동기의 회전자에 부착할 때 발생하므로 Z 펄스 신호의 초기 오프셋 각도(θ_{offset})는 기계각으로 영(Zero)에서 360도까지 임의로 나타나게 된다. 본 논문에서는 엔코더 Z 펄스 신호의 초기 오프셋 각도(θ_{offset})를 추정하기 위한 알고리즘을 제안한다.

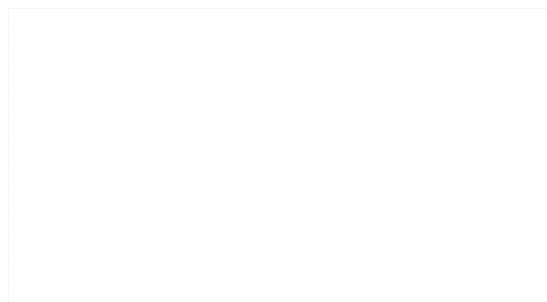
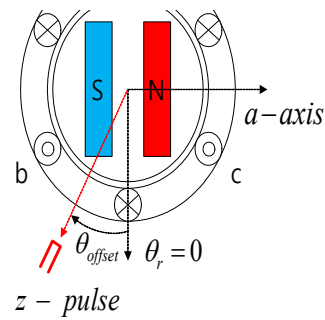
3.1 6-스텝 정렬운전을 이용한 초기위치추정

본 논문에서는 엔코더 Z 펄스 신호의 초기 오프셋 각도(θ_{offset})를 추정하기 위해 회전자의 6-스텝 정렬운전 방식을 이용한다. 영구자석 동기전동기를 연속회전시키기 위해서는 상 역기전력과 해당 상 전류를 동상(In phase)으로 제어함으로써 고정자 상전류에 의한 자속과 회전자 영구자석의 자속이 서로 직각(전기각 90도)을 이루게 하여 최대의 회전 토크를 발생한다. 그러나 초기 회전자 정렬 운전을 위해서는 상 역기전력과 상 전류의 위상을 전기각 90도로 제어하여 토크성분 q축 전류를 영(Zero)으로 제어하고 자속성분 d축 전류를 인가하여 회전자를 정해진 위치에 정렬시킬 필요가 있다. 그림 6은 6-스텝 정렬운전 시 모드 별 고정자 3상 전류의 흐름을 나타낸다. 영구자석 동기전동기를 6개의 전압벡터를 사용하여 6-스텝으로 상전류를 제어할 경우 각 운전 모드에 따라 a, b, c 상의 전류는 그림 6과 같이 흐르게 되고, 이때 고정자 전류에 의해 발생하는 자속의 방향에 따라 회전자는 회전자 좌표계(Rotor reference frame)의



(b) Angle of encoder and rotor magnet flux

Fig. 4 Rotor position and Z pulse when Z pulse is aligned to rotor magnet flux



(b) Angle of encoder and rotor magnet flux

Fig. 5 Rotor position and Z pulse when Z pulse is misaligned to rotor magnet flux

d 축에 정렬된다. 그림 6의 모드 2에서 a 상의 극전압(Pole voltage)은 V_{dc} 이고, b 상과 c 상의 극전압은 영(Zero)이므로 고정자 전류는 a 상에서 b 상 및 c 상으로 흐르게 된다.

그림 7은 그림 6의 6-스텝 정렬운전에서 모드 2 및 모드 3의 경우 고정자 3상 상전류에 의한 고정자 자속과 회전자 영구자석의 자속을 나타낸다. 그림 7에서 λ_{as} , λ_{bs} , λ_{cs} 는 각각 a, b, c 상 전류에 의한 고정자 자속을, λ_s 는 3상 전류에 의한 합성자속을 나타낸다. 모드 2의 경우 a 상 전류는 양(Positive), b 상 및 c 상 전류는 음(Negative)의 값을 가지므로 3상 전류에 의한 고정자 자속은 a 축에 정렬된다. 이 경우 회전자는 그림 7(a)와 같이 고정자 자속과 정렬되며 이 때 회전자 절대위치는 전기각 90도를 갖게 된다. 이와 유사하게 모드 3에서 회전자는 전기각 150도 위치에 정렬한다.

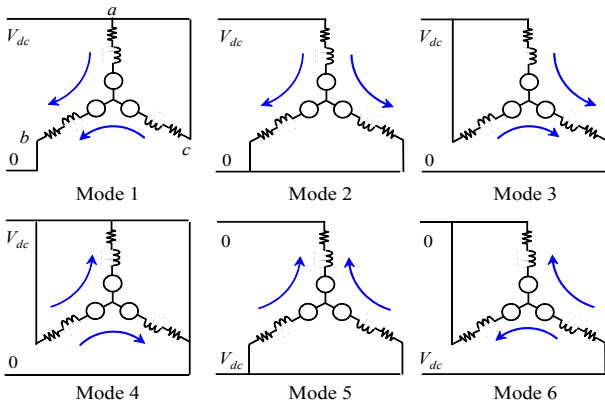
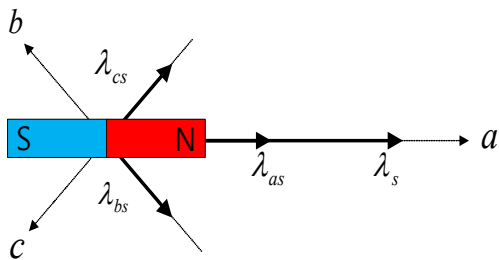
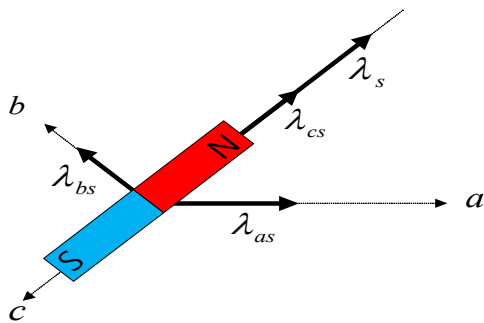


Fig. 6 Six step aligning mode



(a) Stator flux and rotor magnet flux at mode 2



(b) Stator flux and rotor magnet flux at mode 3

Fig. 7 Stator flux and rotor magnet flux

6-스텝 정렬운전 시 엔코더 Z 펄스의 옵셋각을 정확하게 추정하기 위해서는 회전자를 정해진 위치에 정확하게 고정시킬 필요가 있다. 즉 그림 5와 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 모드 2에서 회전자는 절대위치 90도에 정렬하게 되며 이 때 최초 엔코더 Z 펄스의 위치를 엔코더 위치각으로부터 정확히 추정하기 위해서는 가능한 회전자는 절대위치 90도에 고정되어 있어야 한다. 모드 2에서 회전자가 절대 위치 90도에서 벗어나거나 고정되지 않고 움직일 경우 엔코더 Z 펄스의 옵셋각 추정은 오차가 커지게 된다. 특히 엘리베이터 도어는 관성부하이므로 회전자를 모드 1 ~ 모드 6에 해당되는 위치에 정확히 정렬하기 위해 본 논문에서는 회전자가 정해진 위치에 정렬되어 정지할 수 있을 정도의 전류를 모드 별로 1초 동안 인가하고 정렬이 완료된 시점에서의 엔코더 위치각으로부터 Z 펄스의 옵셋각을 추정한다

그림 8은 6-스텝 정렬운전 시 a 상 전류, 회전자 절대위치(θ_r), Z 펄스 옵셋각(θ_{offset}) 및 Z 펄스를 기준으로 계산된 엔코더 위치각(θ_{enc})을 나타낸다.

엔코더 Z 펄스가 그림 4와 같이 회전자의 자극과 일치하게 부착이 되었다면 엔코더 Z 펄스로부터 측정된 엔코더 위치신호(θ_{enc})는 그림 8(b)와 같이 실제 회전자 위치신호(θ_r)와 동일하게 나타난다. 이때 모드 2에서 측정되는 엔코더 위치각(θ_{enc_mode2})은 전기각 90도를 갖게 된다. 반면에 그림 8(c)와 같이 엔코더 Z 펄스와 회전자의 자극위치가 임의의 각도 θ_{offset} 만큼 어긋나 있을 경우, 측정되는 엔코더 위치각(θ_{enc})는 실제 회전자 위치신호(θ_r)와 θ_{offset} 만큼 차이가 나게 된다. 이때 모드 2에서 측정되는 엔코더 위치각(θ_{enc_mode2})는 실제 회전자 위치의 전기각 90도에서 θ_{offset} 만큼의 오차를 갖게 됨을 알 수 있다.

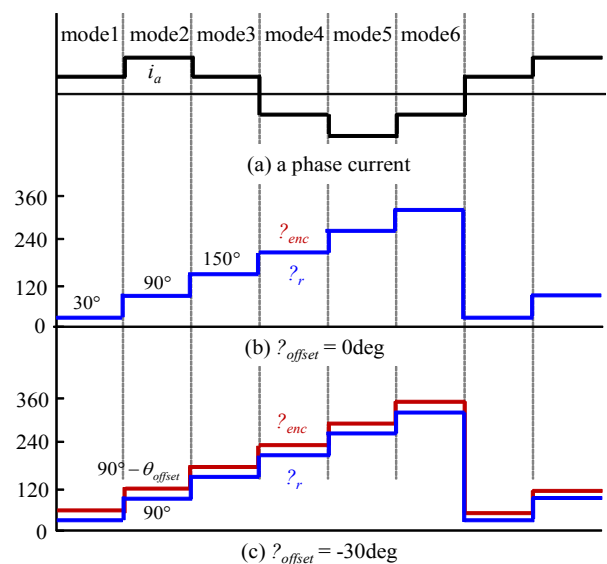


Fig. 8 Phase current and encoder position

Table 1 Elevator door control sequence

Measure initial rotor position (θ_{offset})
↓
Measure door length (Control distance, L_o)
↓
Determine speed pattern of open & close for required drive time (t_3)
↓
Speed control (Open, Close, Reopen)

따라서 실제 회전자 위치(θ_r)와 엔코더 위치각(θ_{enc})의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{enc} = \theta_r - \theta_{offset} \quad (10)$$

실제 회전자 자극의 절대위치가 영(Zero)인 시점과 엔코더의 Z 펄스 신호의 오프셋 θ_{offset} 은 그림 8(c)에 나타난 바와 같이 모드 2에서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{offset} = \frac{\pi}{2} - \theta_{enc, mode2} \quad (11)$$

식 (11)에서 Z 펄스 신호의 오프셋 θ_{offset} 은 초기 회전자 위치 검출 시 여러 번의 모드 2 동작을 통하여 평균을냄으로써 오차를 줄일 수 있다. 식 (10)과 (11)로부터 회전자의 추정위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\theta}_r = \theta_{enc} - \theta_{offset} = \theta_{enc} - \frac{\pi}{2} + \theta_{enc, mode2} \quad (12)$$

3.2 엘리베이터 도어 구동 시퀀스

증분형 엔코더를 사용한 영구자석 동기전동기로 엘리베이터 도어를 구동하기 위한 시퀀스는 표 1과 같다. 먼저 영구자석 동기전동기를 6-스텝 정렬모드로 운전하여 엔코더 Z 펄스신호의 오프셋 각(θ_{offset})을 측정한다. 엔코더 Z 펄스신호의 오프셋 각과 엔코더 A, B 신호로부터 측정된 엔코더 위치각으로부터 식 (12)와 같이 회전자 위치를 추정한다. 추정된 회전자 위치정보를 이용하여 영구자석 동기전동기를 크립속도(Creep speed)로 천천히 구동하여 엘리베이터 도어를 완전 개방에서 완전 닫힘으로, 또한 완전 닫힘에서 완전 개방으로 반복 운전하여 도어의 제어거리 (L_o)를 측정한다. 측정된 제어거리와 운전시간으로부터 도어의 열림 및 닫힘을 위한 속도패턴을 결정한 후 도어의 열림, 닫힘 및 재열림 모드를 수행한다.

Table 2 Motor parameters

Source voltage	220	V
Number of poles	8	
Phase resistance (R_s)	118	Ω
q-axis inductance (L_q)	1.0062	H
d-axis inductance (L_d)	0.6434	H
Magnet flux (λ_m)	0.6447	Wb
Moment of inertia (J)	0.00041	Nm^2

4. 실험 결과

그림 9는 제안된 엘리베이터 도어 제어 알고리즘을 검증하기 위한 실험장치를 나타내고 그림 10은 영구자석 동기전동기 및 제어보드를 나타낸다. 일반적으로 엘리베이터 도어는 도어 자체뿐만 아니라 도어를 앞뒤로 감싸고 있는 카(Car) 도어, 랜딩(Landing) 도어로 구성된다. 본 실험에 사용된 엘리베이터 도어의 한 쪽은 400mm로 좌우 도어의 총 길이는 800mm이다. 이 기준에서 카 도어 및 랜딩 도어의 무게는 약 75kg이므로 도어의 실제 무게를 반영하기 위하여 좌우의 도어에 각각 30kg의 철판을 부착하였다.

영구자석 동기전동기를 구동하기 위한 프로세서는 TMS28035를 사용하였고 PWM 주파수는 10kHz로 설정하였다. 실험에 사용된 영구자석 동기전동기의 파라미터는 표 2와 같다.



Fig. 9 Experimental setup for elevator door speed control



(a) PM synchronous motor (b) Control board

Fig. 10 Motor and control board

그림 11은 6-스텝 정렬모드를 이용한 엔코더 Z 펄스의 초기 오프셋각 측정 및 도어의 제어거리 측정 시의 a 상 및 b 상 전류를 나타낸다. 구동 초기 6-스텝 정렬모드 동작은 도어가 닫혀 있는 상태에서 열리는 방향으로 운전하면서 엔코더 Z 펄스의 초기 오프셋각을 검출한다. 이때, 회전자의 위치에 따라 모드 1 투입 시 회전자는 시계방향 혹은 반시계 방향으로 회전하여 모드 1에 해당하는 위치에 정렬하고 모드 2 ~ 모드 6에 의해 정상적으로 정렬모드로 동작한다. 만약 엘리베이터 도어가 완전히 닫혀 있는 경우 회전자의 위치에 따라서 모드 1 또는 모드 1 ~ 모드 3 등에 의해 도어가 닫히는 방향으로 회전하는 토크가 발생할 수 있지만 닫히는 방향으로 회전하지는 못하고 순차적으로 다음 모드가 인가되며 도어가 열리는 방향의 모드가 인가되는 시점부터 정상적인 정렬모드로 운전한다.

6-스텝 정렬모드에 의해 엔코더 Z 펄스의 초기 오프셋각을 검출한 후 엔코더 위치각으로부터 회전자의 절대 위치를 추정한다. 추정된 회전자 위치정보로 영구자석 동기전동기를 크립속도로 완전 개방 및 닫힘 동작을 반복하여 도어의 길이를 측정한다.

그림 12는 회전자 초기 위치를 검출하기 위한 6-스텝 정렬운전 시 a 상 전류 및 엔코더 위치정보와 추정 위치를 나타낸다. 모드 2의 운전영역에서 Z 펄스를 기준으로 측정된 엔코더의 위치신호는 평균 117.5도를 나타내며 이로부터 엔코더 Z 펄스의 오프셋 각은 -27.5° 로 추정할 수 있다.

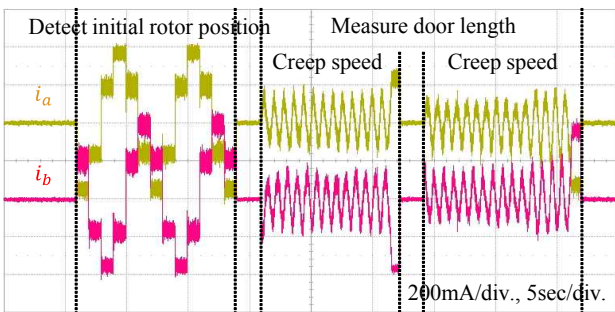


Fig. 11 Measure initial rotor position and door length

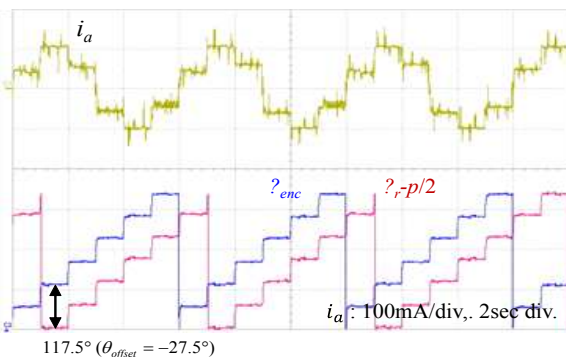


Fig. 12 Measured offset angle of encoder Z pulse

그림 13는 6-스텝 정렬운전으로 측정된 엔코더 Z 펄스의 오프셋 각과 엔코더 위치정보로부터 식 (12)로 계산된 회전자 추정위치와 a 상 역기전력을 나타낸다. 추정된 회전자의 위치는 a 상 역기전력의 기준위치와 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 13에서 a 상 역기전력에 의한 회전자 기준위치에 대한 엔코더 Z 펄스의 오프셋 각은 -29.9° 로 그림 12에 나타난 -27.5° 에 비해 약 2.4도의 오차를 나타낸다. 이러한 회전자 추정위치 오차는 전동기의 MTPA 운전 등에 있어 다소의 제어특성 저하의 원인이 될 수 있으나 본 연구의 엘리베이터 도어 제어의 특성에는 큰 영향이 없다고 판단된다.

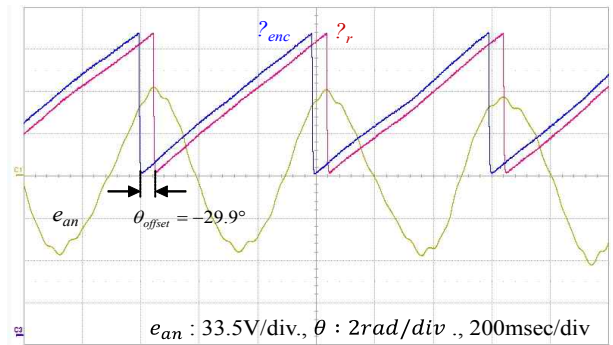
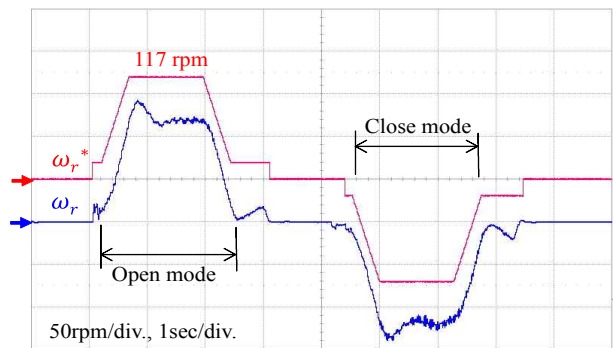
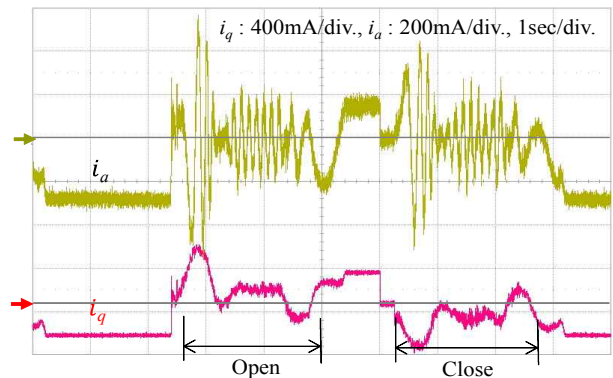


Fig. 13 Real offset angle of encoder Z pulse



(a) Speed profile and real speed



(b) a phase and q-axis currents

Fig. 14 Speed and current for $t_s = 2.2\text{sec}$

그림 14는 정격부하에서 엘리베이터 도어의 닫힘 및 열림 시간을 2.2초의 표준시간으로 설정할 경우 도어의 속도제어 특성을 나타낸다. 엘리베이터 도어의 이동거리는 40cm로 전동기는 기계적으로 3.6회전을 한다. 도어의 열림과 닫힘 시 도어의 가속도는 40cm/sec로 설정하였으며 이 경우 열림과 닫힘의 표준시간을 맞추기 위한 전동기의 최고속도는 속도패턴으로부터 약 117rpm으로 나타난다. 엘리베이터 도어의 경우 관성모멘트가 다른 응용분야에 비해 매우 크므로 도어의 가속구간에서 전동기의 토크는 정속운전에 비해 크게 나타난다. 그림 14(b)에 나타난 바와 같이 가속구간에서의 q 축 전류는 약 500mA로 정속운전 구간의 200mA에 비해 약 2.5배로 나타나며 이는 가속구간에서의 전동기 토크가 정속구간에 비해 약 2.5배 정도 크음을 의미한다.

그림 15와 그림 16은 정격부하에서 엘리베이터 도어의 닫힘 및 열림 시간을 각각 3.5초로 길게 설정할 경우와 1.9초로 표준시간보다 짧게 설정한 경우의 도어의 속도 프로파일 및 실제 속도를 나타낸다. 이 경우에도 표준시간으로 설정된 경우와 같이 도어의 열림과 닫힘 시 도어는 기준속도 및 기준위치를 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 15에 나타난 바와 같이 도어의 열림 및 닫힘 시간을 3.5초로 길게 설정한 경우 정속구간에서의 속도는 63rpm으로 표준시간 2.2초의 정속속도에 비해 약 54%의 속도로 낮아짐을 알 수 있다. 반면에 도어의 열림 및 닫힘 시간을 1.9초로 짧게 설정한 경우 정속구간에서의 속도는 165rpm으로 표준시간의 정속속도 117rpm에 비해 약 48rpm 증가함을 알 수 있다.

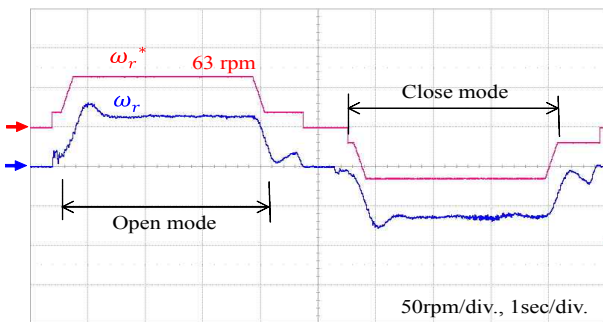


Fig. 15 Speed profile and real speed for $t_s = 3.5\text{sec}$

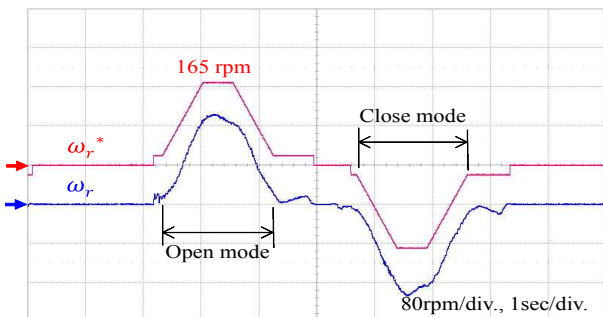
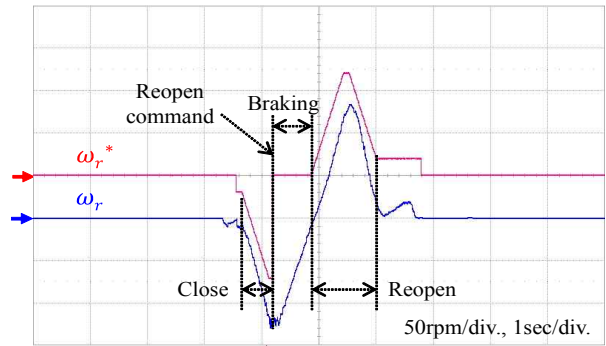
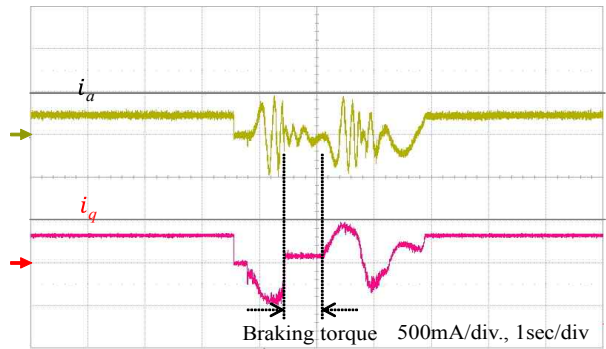


Fig. 16 Speed profile and real speed for $t_s = 1.9\text{sec}$

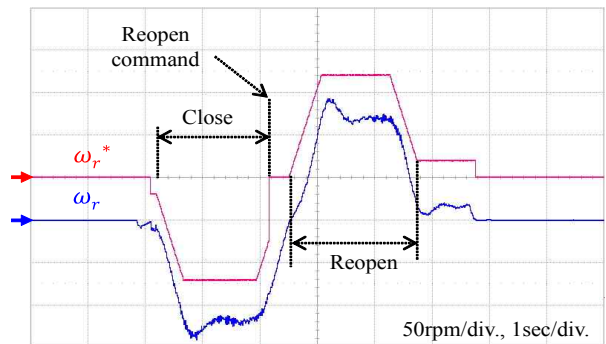


(a) Speed profile and real speed

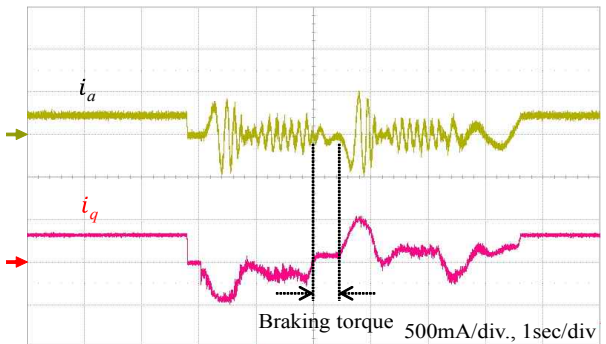


(b) a phase and q-axis currents

Fig. 17 Speed and current for reopen when the door is slightly closed



(a) Speed profile and real speed



(b) a phase and q-axis currents

Fig. 18 Speed and current for reopen when the door is nearly closed

그림 17은 도어가 닫히기 시작하여 정속구간에 도달하기 전에 재열림 명령이 발생한 경우 속도 및 전류를 나타낸다. 재열림 명령이 발생하면 도어를 빠른 시간 내 정지시키기 위해 80mA의 역 전류를 인가하여 제동토크(Braking torque)를 발생한다. 전동기의 속도가 영(Zero)이 되어 도어가 정지하는 시점에서 도어의 현재 위치를 판단하고 완전히 열릴 때까지의 재열림 속도 프로파일을 계산한다. 도어가 얼마 닫히지 않은 시점에서 재열림 명령이 발생한 관계로 재열림 시간도 약 1.2초로 짧음을 알 수 있다.

그림 18은 도어가 거의 닫힌 상태에서 재열림 명령이 발생한 경우 속도 및 전류를 나타낸다. 도어가 거의 닫힌 시점에서 재열림 명령이 발생한 관계로 재열림 시간은 약 2.1초로 열림 모드의 표준시간인 2.2초보다 약간 짧게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기를 사용한 엘리베이터 도어의 속도제어 알고리즘을 제안하였다. 영구자석 동기전동기의 회전자 위치검출을 위하여 증분형 엔코더의 Z 펄스를 기준으로 6-스텝 정렬모드를 이용하여 초기 회전자 영구자석의 자극위치와 Z 펄스의 오프셋 각도를 검출하였다.

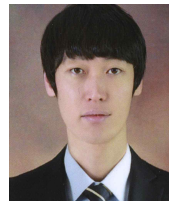
영구자석 동기전동기를 저속으로 열림과 닫힘 동작을 반복하여 초기 엘리베이터 설치 시 엘리베이터 도어의 이동거리를 측정하고 설치환경에 따른 도어의 열림과 닫힘에 요구되는 표준시간에 따라 도어의 속도패턴을 제어기에서 자동으로 설정하였다. 또한 도어의 재열림 시 브레이킹 모드로 동작함으로써 빠른 시간 내 도어를 정지시킬 수 있다. 제안된 엘리베이터 도어의 속도제어 및 영구자석 동기전동기의 회전자 위치검출 알고리즘을 실험으로 검증하였다.

본 연구는 (주)성암전기와 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20114010203030)입니다.

References

[1] K. Y. Song, K. Y. Cho, H. W. Kim, and H. C. Oh, "Position control algorithm of a PMSM for the elevator door system," *Conference of KIPE*, pp. 17-18, Nov. 2012.
 [2] J. A. Gingrich, "Method and apparatus for producing a speed pattern for an elevator car or similar vehicle," US. Patent, No. 4, pp. 220-221, 1980.

[3] K. Y. Cho, Y. K. Lee, H. S. Mok, H. W. Kim, B. H. Jun, and Y. Cho, "Torque ripple reduction of a PM synchronous motor for electric power steering using a low resolution position sensor," *Journal of Power Electronics*, Vol. 10, No. 6, pp. 709-716, Nov. 2011.
 [4] S. Ostlund and M. Brokemper, "Initial rotor position detections for an integrated PM synchronous motor drive," *Proceedings of 30th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 741-747, 1995.
 [5] H. C. Oh, H. W. Kim, K. Y. Cho, K. Y. Song, and B. M. Han, "Initial Rotor position detecting algorithm of PMSM using incremental encoder with Z pulse," *Conference of KIPE*, pp. 21-22, Nov. 2012.
 [6] T. W. Kim, J. Watanabe, S. Sonoda, and J. Hirai, "Initial pole position estimation of surface PM-LSM," *Journal of Power Electronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-8, April 2001.
 [7] J. W. Choi., W. E. Yun, and H. G. Kim, "Initial pole-position estimation of linear motor," *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, Vol. 152, No. 4, pp. 997-1002, July 2005.



송기영(宋基永)

1985년 12월 27일생. 2012년 한국교통대 제어계측학과 졸업. 2012년~현재 동 대학원 석사과정.



오현철(吳炫澈)

1987년 11월 5일생. 2012년 한국교통대 제어계측학과 졸업. 2012년~현재 동 대학원 석사과정.



조관열(趙官烈)

1964년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 1993년~2004년 LG전자 DA연구소 책임연구원. 2004년~현재 한국교통대 제어계측공학과 교수. 당 학회 학술이사.



김학원(金學源)

1968년 3월 30일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전자전산학과 졸업(공학박사). 1991년~2008년 LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 2008년~현재 한국교통대 제어계측공학과 부교수. 당 학회 학술위원.