

초고속 엘리베이터를 위한 9상 동기 전동기 구동 시스템

정은수*, 유현재*, 이승용*, 설승기*, 최홍순**, 최윤영***

*서울대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부

**경북대학교 이공대학 산업전자전기공학부

***현대엘리베이터

A Nine-phase Synchronous Machine Drive System for High-speed Elevator

Eunsoo Jung*, Hyunjae Yoo*, Seung-Yong Lee*, Seung-Ki Sul*, Hong-Soon Choi** and Yun-Young Choi***

*School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

**School of Electrical Engineering, Kyungpook National University, 386 Gajang-dong, Sangju, Gyeongbuk, 742-711, Korea

***Hyundai Elevator Co., Ltd., Icheon-si, Gyeonggi-do, 467-734, Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 초고속 엘리베이터를 구동하기 위한 9상 영구자석 동기 전동기와 이를 구동하기 위한 전력 변환 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 다수의 3상 전동기 구동 시스템을 기반으로 하였다. 이를 제어하기 위한 수학적 모델을 제시하였으며, 3개의 3상 전류 제어기를 적용하여 전동기를 제어하였다. 축소된 9상 축소 시험용(Scaled prototype) 전동기에 대한 실험을 통해 제안된 시스템의 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근, 빌딩의 초고층화에 따라 초고속 엘리베이터에 대한 수요가 지속적으로 증가되고 있으며 엘리베이터의 주행 속도 역시 빨라지고 있다. 기존의 중/저속 엘리베이터 시스템은 3상 영구자석 동기 전동기와 이를 구동하기 위한 전력변환 장치로 구성되지만, 본 논문에서 제안하는 초고속 엘리베이터 시스템은 순시 전력이 1MW 이상인 대용량의 시스템으로, 다상 영구자석 동기 전동기와 전력변환장치로 이루어진다. 다상 전동기의 사용은 시스템의 안정성과 신뢰성을 증대시킬 수 있으며, 토크 맥동의 저감을 통하여 승객의 편의성을 도모할 수 있는 장점이 있다. 또한, 1MW 이상의 대용량 시스템의 경우, 일반적으로 전력용 반도체의 내압과 전류 정격의 한계로 인하여 멀티 레벨 인버터 혹은 병렬 운전 인버터를 전력변환장치로 사용하는데, 특히 병렬 운전 인버터는 내고장성(fault tolerance)이 우수하여 높은 신뢰성을 요구하는 대용량 시스템에 적합하다 [1-2].

그림 1은 본 논문에서 제안하는 초고속 엘리베이터 시스템을 위한 전력 회로와 9상 영구자석 동기 전동기의 개념도이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 제안된 시스템은 PWM 승압형 컨버터와 인버터가 하나의 세트를 이루고 있으며, 3 세트가 병렬로 구성되어 9상 영구자석 동기 전동기를 구동한다. 본 논문에서는 그림 1에서 제안된 초고속 엘리베이터 시스템의 9상 영구자석 동기 전동기의 수학적 모델을 제시하고, 제시된 전동기 모델을

바탕으로, 3개의 동기좌표계 비례적분(Proportional and Integral: PI) 전류 제어기를 적용하여 9상 영구자석 동기 전동기의 토크 제어를 실시한다.

제안된 9상 영구자석 동기 전동기의 수학적 모델과 설계된 전류 제어기의 성능은 축소 모델인 15kW 9상 전동기의 실험을 통하여 검증한다.

2. 제안된 9상 영구자석 전동기의 모델링

본 절에서는 제안된 9상 영구자석 동기 전동기의 수학적 모델링을 수행한다. 제안된 9상 전동기의 간략화된 고정자 권선 구조는 그림 2와 같다. 9상 권선은 3개의 3상 권선으로 간주할 수 있으며, 각 3상의 권선은 전기적으로 서로 분리되어 있다. 본 논문에서는 각 3상 권선을 하나의 세트(set)로 정의한다. 각 세트는 3개의 단자가 있고, 이들은 서로 전기각으로 120° 씩 떨어져 있다. 그림 2의 표기는 각 세트의 번호와 상 이름을 나타낸 것으로, 예를 들어 b2는 세트 2의 b상 권선을 의미한다.

표면부착형 영구자석 동기 전동기는 구조적 특성으로 인하여 임의의 두 권선 사이의 상호 인덕턴스가 각 변위에 무관하며, 이에 따라서, 세트 1의 a상의 전압 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다 [3].

$$v_{a1} = R_s i_{a1} + L_{self} \frac{di_{a1}}{dt} + L_m \frac{d}{dt} (i_{b1} + i_{c1} + i_{a2} + i_{b2} + i_{c2} + i_{a3} + i_{b3} + i_{c3}) + e_{a1} \quad (1)$$

여기서 R_s 는 a1 권선의 상 저항, L_{self} 는 a1 권선의 자기 인덕턴스, L_m 은 다른 권선과의 상호 인덕턴스를 나타내며, e_{a1} 는 영구자석에 의한 역기전력을 의미한다.

제안된 9상 전동기의 각 세트는 Y-결선으로 연결되어, 각 3상 전류의 합은 0이 되고, 이에 따라 식(1)의 전압 방정식은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$v_{a1} = R_s i_{a1} + (L_{self} - L_m) \frac{di_{a1}}{dt} + e_{a1} + L_m \frac{d}{dt} (i_{a2} + i_{b2} + i_{c2}) + L_m \frac{d}{dt} (i_{a3} + i_{b3} + i_{c3}) = R_s i_{a1} + (L_{self} - L_m) \frac{di_{a1}}{dt} + e_{a1} \quad (2)$$

$$i_{b1} + i_{c1} = -i_{a1}, i_{a2} + i_{b2} + i_{c2} = 0, i_{a3} + i_{b3} + i_{c3} = 0$$

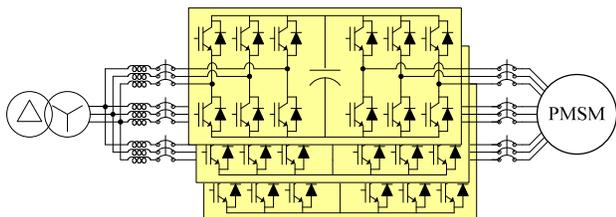


그림 1. 제안된 9상 전동기 구동 시스템

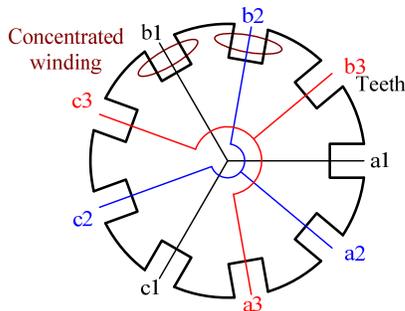


그림 2. 제안된 전동기의 간략화된 고정자 구조

식(2)에서 $L_{self} - L_m$ 을 동기 인덕턴스 L_s 로 대체하면, 세트 1의 a 상 전압 방정식은 일반적인 3상 영구자석 동기전동기의 일반적인 수식과 같게 된다 [4]. 같은 방법으로 b, c 상에 대한 전압방정식을 얻을 수 있고, 이를 d-q 좌표계로 변환하면 다음과 같은 정지좌표계 상의 d-q 축 전압 방정식을 얻을 수 있다.

$$v_{ds1}^s = R_s i_{ds1}^s + L_s \frac{di_{ds1}^s}{dt} + e_{ds1}^s \quad (3)$$

$$v_{qs1}^s = R_s i_{qs1}^s + L_s \frac{di_{qs1}^s}{dt} + e_{qs1}^s$$

각 세트의 역기전력을 정현파로 가정하고, 식 (3)을 회전자 기준 좌표계로 변환하면, 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$v_{ds1}^r = R_s i_{ds1}^r + L_s \frac{di_{ds1}^r}{dt} - \omega_r L_s i_{qs1}^r \quad (4)$$

$$v_{qs1}^r = R_s i_{qs1}^r + L_s \frac{di_{qs1}^r}{dt} + \omega_r (L_s i_{ds1}^r + \lambda_f)$$

여기서 ω_r 은 회전자의 전기 각속도이며, λ_f 는 영구자석에 의해 고정자 권선에 쇄교되는 자속을 나타낸다. 표면부착형 영구자석 동기기의 경우, q-축 성분만이 토크에 기여하기 때문에, 세트 1에 의한 토크 식은 다음과 같이 표현할 수 있다 [4].

$$T_{el} = \frac{3P}{2} \lambda_f i_{qs1}^r \quad (5)$$

이 때 P 는 전동기의 극수를 나타낸다.

제안된 9상 전동기의 각 세트는 그림 3과 같이 전기각으로 40° 씩 떨어져 있으므로, 세트 2와 3의 회전자 좌표계 변환식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

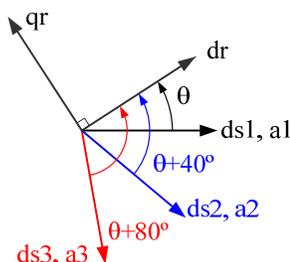


그림 3. 각 고정자 권선 사이의 관계

$$f_{dq2}^r = f_{dq2}^s e^{-j(\theta_r + 2\pi/9)} \quad (6)$$

$$f_{dq3}^r = f_{dq3}^s e^{-j(\theta_r + 4\pi/9)}$$

$$f = v \text{ 또는 } f = i$$

여기서 θ_r 은 회전자의 전기 각을 나타낸다. 9상 전동기 전체 토크는 각 세트에 의한 토크의 합으로 나타낼 수 있으며, 식 (5)와 (6)을 이용하여, 전체 토크식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{el} = \frac{3P}{2} \lambda_f (i_{qs1}^r + i_{qs2}^r + i_{qs3}^r) \quad (7)$$

위에서 보인 바와 같이, 제안된 9상 영구자석 동기전동기는 3개의 독립적인 3상 전동기로 모델링될 수 있으며, 독립적인 3개의 전류제어기를 이용하여 전체 시스템의 토크를 제어할 수 있다.

3. 제안된 9상 영구자석 전동기의 전류 제어

2절에서 언급한 바와 같이, 제안된 9상 영구자석 동기전동기의 각 세트 사이에는 전기적인 상호작용이 없으므로, 각 고정자 권선 세트의 전류를 독립적으로 제어할 수 있다. 또한 각 권선의 전압 방정식이 일반적인 3상 영구자석 동기전동기와 동일하므로, 산업계에서 널리 사용되는 동기좌표계 비례적분 전류제어기를 동일하게 적용할 수 있다. 세트 1에 대한 전류제어기 전달 함수는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{dq1}^{r*} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (I_{dq1}^{r*} - I_{dq1}^r) + V_{dq1_ff}^r \quad (8)$$

여기서 K_p 와 K_i 는 각각 전류제어기의 비례 이득과 적분 이득을 나타낸다. 그리고 $V_{dq1_ff}^r$ 은 식(4)의 상호 간섭항과 역기전력항을 보상하기 위한 전압으로 다음과 같이 정의된다.

$$v_{ds1_ff}^r = -\omega_r L_s i_{qs1}^r \quad (9)$$

$$v_{qs1_ff}^r = \omega_r (L_s i_{ds1}^r + \lambda_f)$$

동기좌표계 비례적분 전류제어기는 정상상태 오차가 없고, 제정수 변화에 강인하다는 장점으로 인하여 산업계에서 널리 사용되고 있지만, 전동기 역기전력이 이상적인 정현파가 아니고, 데드 타임(dead time) 등의 인버터의 비선형적 요소로 인하여 합성된 전압에 왜곡이 발생하여, 전동기 상 전류 파형에 왜곡이 생길 수 있다 [4]. 이러한 왜곡은 일반적으로 동기좌표계 상에서 6고조파 성분으로 나타나게 된다. 제안된 시스템의 경우, 각 세트 사이의 위상차가 40° 이므로, 각 세트의 6고조파는 서로 120° 의 위상차를 가지게 된다. 따라서 각 세트의 6고조파 전류에 의한 토크 맥동은 서로 상쇄될 수 있다. 즉, 제안된 시스템의 전류 제어 방법을 통해 6고조파 성분의 토크 맥동이 크게 줄일 수 있다.

4. 실험 결과

본 절에서는 위에서 제안된 9상 전동기 구동 시스템의 모델링의 실효성과 전류 제어 성능을 실험을 통해 검증한다. 제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위해 15kW 9상 축소 모델 전동기를 제작하였으며, 그림 4의

왼쪽 전동기는 3 상 부하 전동기이며, 오른쪽 전동기는 9 상 전동기이다. 표 1 에 축소 모델 9 상 전동기의 제정수가 나타나 있다.

9 상 전동기의 특성을 확인하기 위해, 부하 전동기를 150r/min 의 일정 속도로 운전하여, 상 전압 파형을 확인하였다. 그 결과, 기본파 전압 크기는 170V 이며, 3 고조파와 5 고조파의 크기는 각각 6V 와 4V 정도이다. 기본파에 비해 고조파의 크기가 무시할 만큼 작으므로, 영구자석에 의한 역기전력을 정현파로 가정하는 것은 타당하다고 할 수 있다.

축소 모델 전동기에 대한 전류 제어를 수행한 결과는 그림 5 와 같다. 그림 5 를 보면, 각 세트 사이의 전류 위상 차이를 확인할 수 있다. 각각 전기적으로 40° 씩 떨어져 있음을 확인할 수 있다.

그림 6 은 각 전류 제어기에 의해 제어된 q-축 전류 파형을 나타낸 것으로, 각 전류의 평균값은 약 12.5A 이며, 전류 맥동 성분은 0.5A 미만으로 나타난다. 이 맥동 성분은 크게 동기 주파수의 6 고조파 성분과 동기 주파수의 2.2 배에 해당하는 주파수 성분으로 나눌 수 있다. 예상한 바와 같이, 전체 전류의 합에는 인버터 출력의 비선형성과 역기전력 고조파에 의한 6 고조파 성분이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 동기 주파수의 2.2 배에 해당하는 저주파수의 맥동은 시스템의 기계적 특성에 의한 것으로 제어 시스템의 특성과는 무관한 것이다. 따라서, 전기적 원인에 의한 토크 맥동은 제안된 9 상 전류 제어 시스템에 의해 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 초고속 엘리베이터를 위한 9 상 영구자석 동기 전동기 구동 시스템을 제안하였다. 전동기 구조로부터 수학적 모델을 구하고, 이를 근거로 일반적인 3 상 전류 제어기를 9 상 전동기 제어에 적용할 수 있는 방법을 제시하였다.

제안된 시스템의 모델과 제어 방법의 타당성을 15kW 9 상 축소 모델 전동기의 실험을 통해 검증하였다. 9 상의 전류는 각 40° 의 위상차를 가지며 정현적으로 잘 제어 되었으며, 전동기의 전체 토크를 의미하는 q-축 전류의 합에서는 전기적으로 발생되는 토크의 맥동 성분이 잘 상쇄 되었음을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] K. Marouani, L. Baghli, D. Hadiouche, A. Kheloui, and A. Rezzoug, "A New PWM Strategy Based on a 24-Sector Vector Space Decomposition for a Six-Phase VSI-Fed Dual Stator Induction Motor," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 5, pp. 1910 – 1920, May 2008.
- [2] M. A. Abbas, R. Christen, and T. M. Jahns, "Six-Phase Voltage Source Inverter Driven Induction Motor," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 5, pp. 1251 – 1259, Sep/Oct 1984.
- [3] J.R. Hendershot Jr. and TJE Miller, Design of Brushless Permanent-magnet Motors, *Magna Physics – Oxford*, 1994.
- [4] 설승기, 전기기기 제어론 개정판, 홍릉과학출판사, 2009.

표 1. 9 상 건본 전동기의 제정수 (한 세트)

정격 출력 (kW)	4.8
정격 속도(r/min)	191
정격 토크 (Nm)	240
극수 / 슬롯수	32 / 36
상저항 (mΩ)	0.57
상인덕턴스 (mH)	23
역기전력상수 (Wb)	0.70



그림 4. 건본 시스템 실험 세트

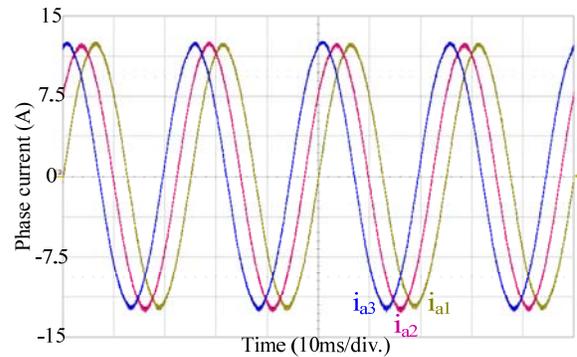


그림 5. 각 세트별 상전류 파형

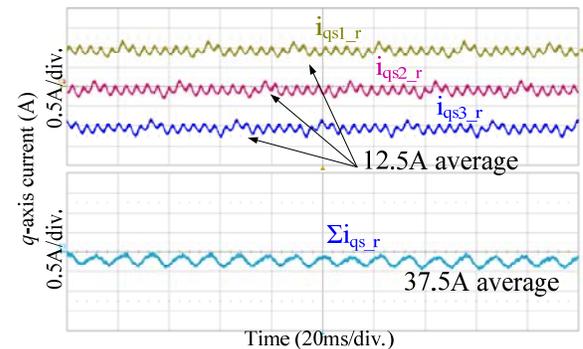


그림 6. 각 세트의 q 축 전류 및 q 축 전체 전류 합