

불가역 감자특성을 고려한 Line-Start Motor의 회전자 형상설계

강규홍 · 이선권 · 홍정표 · 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

Rotor Shape Design of Line-Start Motors considering demagnetization

Gyu-Hong Kang · Sun-Kwon Lee · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim ·  
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

**Abstract** - This paper deals with analysis for demagnetization characteristic of a ferrite magnet line start motor using FEM. Maximum start and clock currents are calculated by transient state voltage and dynamic equation, and then, these currents are applied to FE analysis. The characteristics of motor according to partial demagnetization are analyzed from FE analytic results, and rotor shape is designed for improvement of demagnetization characteristic.

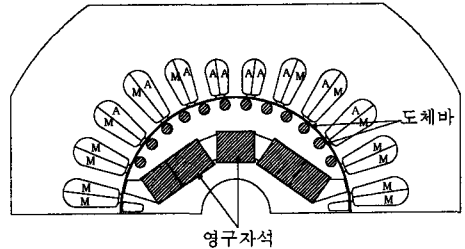


그림 1. 해석대상의 회전자 구조

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 기동 및 운전을 위하여 별도의 구동장치가 요구되므로 고 효율 운전은 가능하지만 구동 장치에 의한 전체 cost의 상승을 초래한다. 반면, 유도 기동형 영구자석 동기전동기의 경우 별도의 구동장치 없이 상용전원으로도 기동 및 고 효율 운전이 가능하므로 산업용 기기뿐만 아니라 특히 고 효율, 저 cost를 요구하는 가전(家電) 분야에 광범위하게 적용 가능하다.

이러한 직입 기동형 동기전동기(Line start synchronous motor)의 경우 회전자에 영구자석과 도체를 함께 구성하여 과도상태에서 전자(電磁)유도 현상에 의한 유도기동으로부터 기동토크를 확보한다. 그러나 직입 기동형 전동기의 경우 전동기 구속상태 뿐만 아니라 기동시 전동기에 유입되는 전류가 매우 커 영구자석에 큰 감자계가 형성되어 영구자석의 성능이 저하하는 문제가 발생할 수 있다. 특히 불가역 감자(減磁)특성을 가지는 페라이트계 영구자석을 채용하는 경우 기동 전류에 의한 영구자석 불가역 감자의 문제가 발생한다. 따라서 직입 기동형 영구자석 동기전동기의 경우 기동시의 외부 자계에 의한 영구자석 불가역 감자특성의 해석과 이를 고려한 설계가 병행되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 페라이트계 영구자석을 채용한 단상 유도형 동기전동기의 불가역 감자특성을 해석하였다. [1] 과도상태에서의 전압방정식과 운동방정식으로부터 기동 및 구속시의 최대전류를 산정하였고 이를 유한요소 해석에 적용하여 전동기 철심과 영구자석을 함께 비선형 처리하였다. 해석결과로부터 국부적인 감자에 따른 전동기 특성을 분석하고 외부 감자계에 대한 불가역 감자 특성을 향상시키는 회전자 형상을 설계하였다.

2. 불가역 감자 해석 이론

Line start motor의 외부 감자계 영향은 전압방정식과 운동방정식을 결합하여 기동 및 구속시의 과전류를 유한요소 해석에 적용하였다. 본 논문에서의 해석 대상으로 선정된 Line start motor는 고정자에 주권선과 보조권선으로 구성된 단상 유도형 동기전동기로서 그림 1에 나타내었다. 회전자는 영구자석과 유도 기동 토크를 확보하기 위한 도체로 구성되어 있고 영구자석은 저가격의 페라이트계를 사용하였다.

단상 유도형 동기전동기의 고정자 및 회전자축 d-q축 전압방정식과 기계적 운동방정식은 다음과 같다. [2,3]

$$v_d = R_d + pL_{d'}i_d - \omega_r L_{mq}i_q + pL_{md}i_{2d} - \omega_r L_{mq}i_{2q} \quad (1)$$

$$v_q = \omega_r L_{d'}i_d + R_q + pL_{q'}i_q + \omega_r L_{md}i_{2d} + pL_{mq}i_{2q} + \omega_r L_{md}i_{fm} \quad (2)$$

$$0 = pL_{md}i_d + (R_2 + pL_{2d})i_{2d} \quad (3)$$

$$0 = pL_{mq}i_q + (R_2 + pL_{2q})i_{2q} \quad (4)$$

$$E_0 = \omega_r L_{md}i_{fm} \quad (5)$$

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (6)$$

여기서  $L_{md}$ 와  $L_{mq}$ 는 각각 d-q축 자화 인덕턴스,  $i_d$ 와  $i_q$ 는 고정자 d-q축 전류,  $i_{2d}$ 와  $i_{2q}$ 는 회전자 도체에 유입되는 d-q축 전류이다.  $E_0$ 는 동기속도 운전시의 무부하 역기전력이다. 기계적 운동방정식에서  $T_e$ 는 전자기적 발생 토크,  $\omega_m$ 는 회전자의 기계적 회전 각속도,  $T_L$ 은 부하 토크,  $J$ 는 회전자 관성모멘트,  $B$ 는 점성마찰계수이다.

단상 유도형 동기전동기의 주권선과 보조권선의 기차력 차, 저항 차를 권선비와 권선 배치각으로 고려하여 2상전동기로 변환하여 과도상태 해석을 수행하였다. 과도상태 해석 과정은 그림2와 같다.

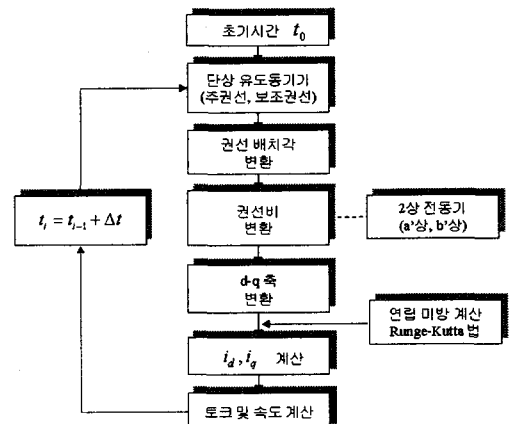


그림 2. 과도상태 해석과정

과도상태 해석의 결과로부터 기동시 주권선 및 보조권선의 최대전류가 영구자석의 외부 감자계가 작용하도록 유한요소 해석에 적용하였다. 페라이트계 영구자석의 경우 불가역 감자 특성을 가지는 굴곡점(knee point)이 2상한 동작영역에 존재하므로 외부 감자계에 의한 불가역 감자가 발생할 수 있다. 특히, 제어용 전원 없이 직입 기동하는 Line start motor의 경우 기동시 큰 전류가 발생하며 기동 토크가 부족한 경우 전동기 외부 감자계 영향은 더욱 증가하게 된다. 페라이트계 영구자석의 2상한 동작 특성으로부터 외부 감자계에 의한 불가역 감자특성을 그림 3에 나타내었다.

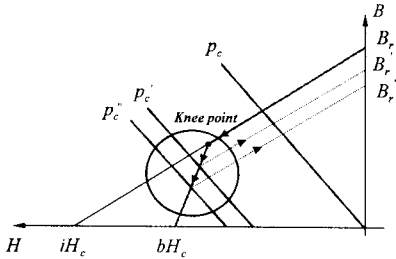


그림 3. 영구자석 B-H 및 외부 감자계 특성

유도형 동기전동기의 회전자에 구성되어 있는 도체의 영향은 slip 1의 기동 및 구속시 고정자 권선과 회전자 도체의 기자력 관계는 그림 4와 같다. 고정자 권선에 의한 자속이 -d축에 존재할 때 slip 1에서는 2차측 저항이 매우 커 회전자 도체 전류에 의한 자속과 고정자 권선 전류에 의한 자속의 위상차는 90°에 가깝다. 또한 기동시 고정자측 기자력과 회전자의 기자력은 동일하다고 가정하였으며, 유한요소법을 이용한 불가역 감자 해석 과정을 그림 5에 나타내었다.

$$k_{um} N_m \dot{I}_m + k_{ua} N_a \dot{I}_a = N_2 \dot{I}_2 \quad (6)$$

여기서  $k_{um}$ 와  $k_{ua}$ 는 주권선 및 보조권선의 권선계수이다.

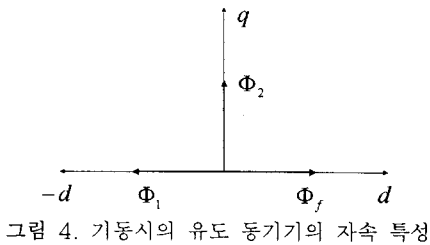


그림 4. 기동시의 유도 동기기의 자속 특성

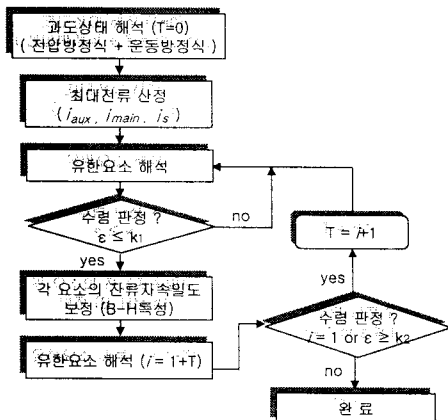


그림 5. 영구자석 불가역 감자 특성 해석과정

### 3. 해석 결과

과도상태 해석을 위한 해석모델의 전기적 제원을 표 1에 나타내었다.

표 1. 해석모델의 전기적 제원

항목	수치	항목	수치
인가전압	115[V]	주파수	60[Hz]
잔류자속밀도	0.4[T]	무부하 역기전력	57.6[V]
주권선 저항	2.8 [Ω]	보조권선 저항	6.8 [Ω]
d축 인덕턴스	130[mH]	q축 인덕턴스	700[mH]
기동 캐패시턴스	100 [μF]	운전 캐패시턴스	12 [μF]

정격부하 상태에서의 기동시 주권선 및 보조권선 전류 특성을 그림 6에, 구속시의 전류특성을 그림 7에 나타내었다. 기동 및 구속시 주권선 전류의 최대치는 22[A], 보조권선 전류는 7[A]로써 유한요소법에 의한 불가역 감자특성 해석에서 영구자석이 외부 감자계에 가장 큰 영향을 받는 조건으로 설정하여 해석하였다.

본 논문에서의 해석 모델은 영구자석이 회전자 내부에 매입된 구조로써 영구자석 자극과 고정자 권선에 의한 자극의 상대 위치에 따라 철심의 국부적인 포화정도는 달라진다. 따라서 영구자석 불가역 감자특성 해석에서 영구자석과 외부 감자계와의 상대적 위치에 따른 감자 특성을 그림 8에 나타내었다.

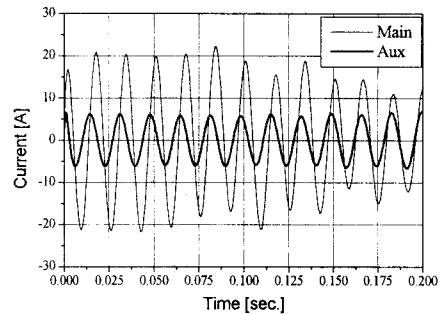


그림 6. 순시기동전류 특성-주권선, 보조권선

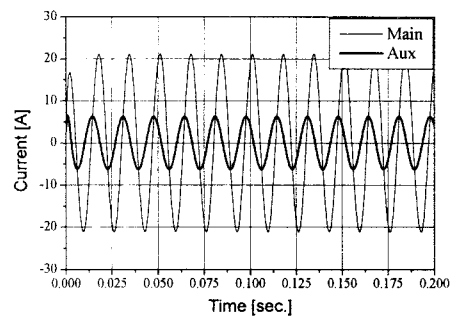
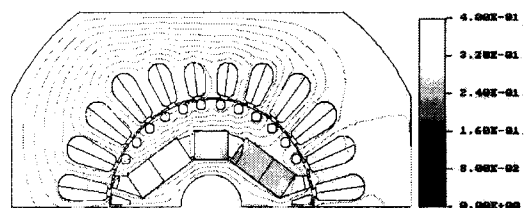
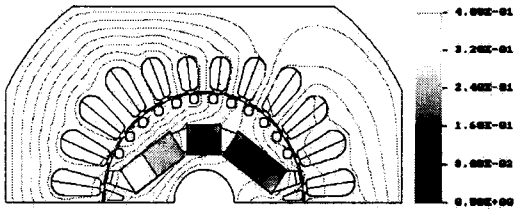


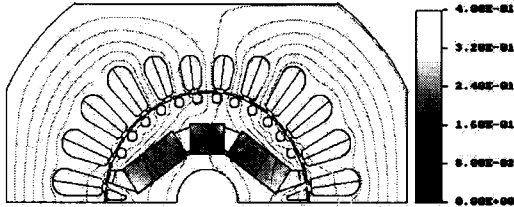
그림 7. 구속시 전류 특성-주권선, 보조권선



(a) 135°



(b) 150°



(a) 180°

그림 8. 외부 감자계의 자극위치에 따른 불가역 감자특성

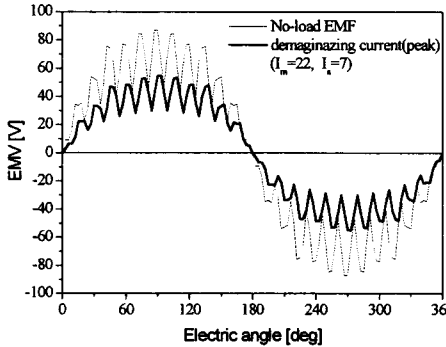


그림 9. 역기전력 특성

해석결과 외부 감자계의 자극 위치에 따라 영구자석의 극부적인 불가역 감자가 발생하며 -d축(180°)에서 감자 영향은 영구자석 전 영역에 걸쳐 최대로 발생하였다. 직입 기동형 영구자석 전동기의 외부자계에 의한 불가역 감자 현상은 역기전력의 감소와 기동전류의 증가가 반복되므로 불가역 감자현상은 더욱 증가한다. 따라서 해석시에는 불가역 감자 영향이 가장 큰 조건에서 해석하는 것이 타당하다.

영구자석의 잔류자속밀도가 일정한 초기상태와 외부 감자계가 인가된 후 영구자석 불가역 감자가 발생한 경우의 무부하 역기전력 특성을 그림 9에 나타내었다. 해석모델에서의 과도상태 해석으로부터 기동시 최대전류를 인가하여 해석한 결과 무부하 역기전력은 55.2[V]에서 23.6[V]로 53(%) 감소하였다. 따라서 직입기동형 영구자석 전동기는 기동전류에 의한 영구자석 불가역 감자 특성을 고려한 설계가 이루어져야함을 알 수 있다.

#### 4. 불가역 감자를 고려한 회전자 형상설계

외부자계에 의한 불가역 감자 영향을 억제하는 방법으로는 기동시의 전류를 제한하는 방법과 외부 감자계가 직접 영구자석에 미치지 않도록 회전자 형상설계를 하는 방법이 있다. 본 논문에서는 고정자 체인의 변경없이 회전자 형상설계를 통한 불가역 감자 영향이 최소화도록 회전자 형상설계를 하였다. 설계 변수로는 기동 도체 수와 매입형 회전자의 영구자석 매입 위치 및 영구자석 두께를 변수로 하여 형상설계를 수행하였다. 설계의 과정은 설계 변수 각각을 변화시켜 그림 5의 해석과정을 통하여 각각의 설계 변수 변화 과정을 그림 10에 나타내었다.

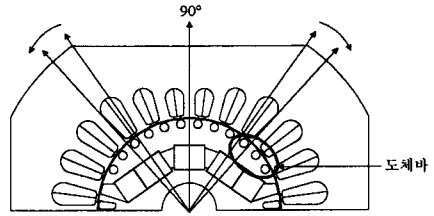


그림 10. 회전자 형상설계 과정

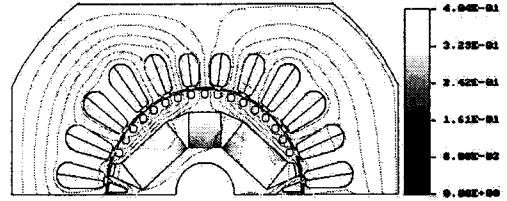


그림 11. 회전자 형상 설계 모델의 불가역 감자특성

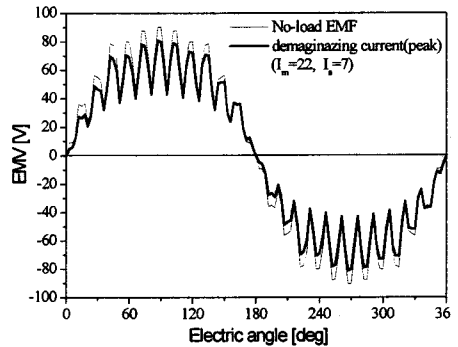


그림 12. 회전자 형상 설계 모델의 역기전력 특성

회전자 형상 변화에 따른 영구자석 불가역 감자 특성을 해석한 결과 영구자석의 화방향 길이와 회전자 도체 바의 수는 증가하고 영구자석의 회전자 내부 매입 각도의 변화에 따라 불가역 감자현상은 급격히 감소함을 알 수 있다. 회전자 형상 설계된 모델의 불가역 감자해석 후 역기전력 특성을 그림 12에 나타내었다. 역기전력은 초기 상태 57.8[V]에서 불가역 감자 해석 후 52[V]로 10(%) 감소하여 초기 모델에 비해 불가역 감자 영향을 크게 개선하였다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 직입 기동형 영구자석 동기전동기의 불가역 감자 특성해석을 과도해석과 유한요소법을 적용하여 해석하였다. 해석결과 직입 기동형 영구자석 전동기는 기동 및 구속시의 큰 전류에 의해 영구자석의 불가역감자 특성이 크게 작용함을 알 수 있다. 본 논문에서 제시한 해석방법으로부터 회전자 형상변화에 따른 불가역 감자특성을 최소화하는 회전자 형상설계를 수행하였다. 설계 결과 불가역 감자에 따른 역기전력의 감소 영향은 초기모델 53(%)에 비해 크게 줄어든 10(%)로 만족할 만한 결과를 얻었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Sheppard J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995
- [2] Timothy J. E. Miller, "Single-Phase Permanent Magnet Motor Analysis", IEEE Trans. Industry Application, no. 4, pp. 651-658, 1985.
- [3] 이선권, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "단상 영구자석형 유도동기기의 과도상태해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp. 147-149, 2001