단상 LSPM 동기전동기의 비선형 효과를 고려한 동특성해석

유병훈 , 김병택
국립군산대학교

Dynamic Characteristic Analysis of a Single-phase Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Non-linear Effects

Byoung-Hun Yu and Byung-Taek Kim
Dept. of Electrical Eng., Kunsan National University, Korea

Abstract - 본 논문에서는 자성재료의 비선형성을 고려한 단상 직입 영구자석형(LSPM) 동기전동기의 기동특성해석을 다룬다. 전동기의 운전상태에 따른 자성재료의 비선형특성을 고려하기 위해 정자장 유한요소법을 이용하여 d축과 q축에 대해 전류변화에 따른 인덕턴스를 추출하였다. 계산된 인덕턴스를 LSPM의 등가회로에 적용하였으며 Runge-Kutta 법을 이용하여 시간차분해석을 수행하였다. 제시된 해석방법으로 계산된 기동특성과 유한요소해석결과를 비교함으로써 비선형의 영향을 고찰하였다.

1. 서 론

오늘날 에너지 문제가 전 세계적 문제로 대두되면서 여러 산업기기분야 및 가전기기분야에서 고효율 기기개발에 중점을 두고 있다. 현재 가전용 기기의 동력원으로는 고정자 및 회전자의 구조가 간단하고 상용전원으로 운전이 가능한 단상 유도전동기가 주로 사용하고 있다. 그러나 단상 유도전동기의 효율은 오랜 연구개발의 덕분에 최초 보급화 당시에 비해 크게 개선되었으나, 전동기 고유의 구조적 문제로 한계에 다다르고 있다.

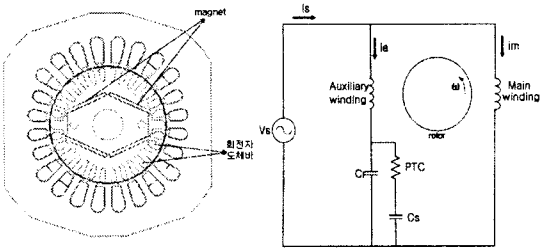
따라서 최근 단상 유도전동기처럼 별도의 전원장치가 필요 없으며 보다 효율이 높은 단상 LSPM 전동기가 많은 분야에서 연구되고 있다. 단상 LSPM 전동기는 회전자에 도체 바와 영구자석을 가지므로 유도전동기의 특성과 동기전동기의 특성을 동시에 나타낸다.[5] 즉 동기속도로 운전하는 정상상태에서는 동기전동기의 특성을 가지므로 유도전동기에 비해 효율이 높지만 기동 시 자석에 의한 역기전력으로 인해 부 토크가 발생하고 자석의 낮은 투자율은 회전자 위치에 따른 자기저항의 차를 발생시켜 릴럭턴스 토크가 존재한다. 이 같이 복잡한 전자기적 특성 때문에 LSPM전동기의 특성을 분석하는 방법으로 등가회로보다는 유한요소해석을 주로 이용하는 편이다. 그러나 등가회로해석이 정밀하게 해석이 수행된다면, 해석결과로부터 분석 가능한 정보량이 많아지며 설계에 쉽게 적용될 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서는 LSPM전동기의 복잡한 현상인 dq인덕턴스의 비선형성을 회로해석에 도입하고자 한다. 즉 고정자와 회전자전류에 흐르는 전류에 의한 자기적 변화를 고려하여 단상 LSPM 전동기의 기동특성해석을 수행하였다. 기동특성 해석을 위하여 d-q축 변환을 통해 고정자 및 회전자의 전압방정식을 구성하였다. 고정자 및 회전자의 전압방정식과 기계적 운동방정식을 결합한 연립미분전압방정식을 구성하였다. 그리고 유한요소법을 이용하여 d-q축 전류에 대한 d-q축 인덕턴스를 추출하였고 추출된 인덕턴스를 연립미분전압방정식에 적용하고, 4계 runge-kuta method로 기동특성해석을 하였다. 본 논문에서 제시한 기동특성해석결과를 FEM을 이용한 기동특성해석결과와 비교하였다.

2. 비선형 특성을 고려한 기동특성해석

2.1 유한요소법을 이용한 회로정수 추출

2.1.1 해석모델 및 등가회로



(a) 해석모델 (b) 등가회로

그림 1. 해석모델의 구조와 회로도

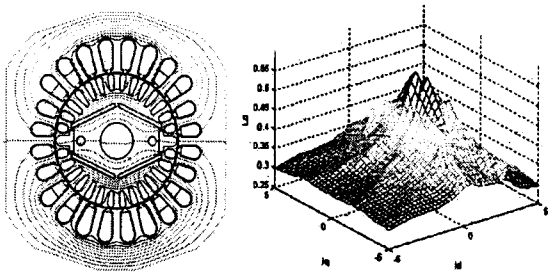
본 논문에서 해석 대상으로 적용한 단상 LSPM 전동기는 그림 1과 같고, 회로도를 그림 2에 나타내었다. 그리고 전동기의 전기, 기계적 사양을 표 1에 제시하였다.

표 1. 해석모델의 사양

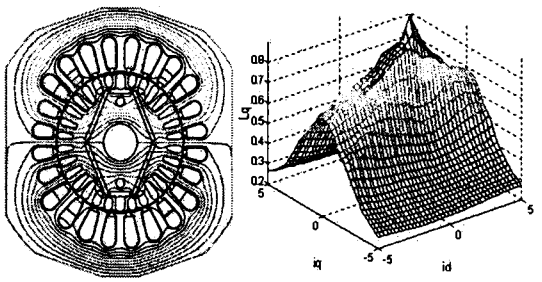
전압	220[V]	운전콘덴서	3[uF]
주파수	60[Hz]	적층길이	45[mm]
영구자석	NdFeb	고정자외경	124.6[mm]
기동콘덴서	40[uF]	고정자내경	61[mm]

2.1.2 d-q축 인덕턴스 추출

유도기와 마찬가지로 단상 LSPM 전동기는 기동시 고정자와 회전자도체에 매우 큰 전류가 흐르며, 이로인해 인덕턴스 변화가 심하다. 본 논문에서는 비선형 특성을 고려한 기동특성을 해석하기 위해 유한요소 해석을 이용하여 전류의 크기에 따른 d-q축 인덕턴스를 구하였다. d축과 q축에 대해 각각 전류량 변화에 따라 정자장 유한요소해석을 수행하였다. 이 때 자석으로부터 발생하는 자속의 영향이 동시에 고려되어야하므로, 고정자전류와 영구자석을 source로 하여 정자계 시뮬레이션을 수행하였고, 이후 고정투자율법을 적용하여 각각의 인덕턴스를 얻었다. 자속밀도의 분포와 dq축 인덕턴스를 그림3에 나타내었다. 그림으로부터 d축 인덕턴스가 q축에 비해 상당히 작음을 알 수 있으며, 이는 잘 알려진 바와 같이 회전자의 구조에 기인한다. 또한 전류량이 커질수록 인덕턴스가 작아지는 포화현상이 나타나며, 이 현상은 d축에 비해 q축이 심한 것을 알 수 있다.



(a) d축 전류에대한 자속분포와 인덕턴스



(b) q축 전류에대한 자속분포와 인덕턴스

그림 3. d-q축 전류에대한 d-q축 인덕턴스

2.1.3 무부하 역기전력

유한요소법으로 영구자석에 의한 무부하 역기전력 특성은 해석 영역에서 권선을 쇄교하는 자속의 시간 미분항인 식(1)로부터 산정하였다. 유한요소법을 이용하여 보조권선에 유기되는 역기전력을 그림 4에서 나타내었다. 이로부터 실효치 전압을 식(2)를 이용하여 계산하였고, 164V이다.

$$e_0 = \frac{d\lambda}{dt} \tag{1}$$

$$E_0 = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e_0 dt} \tag{2}$$

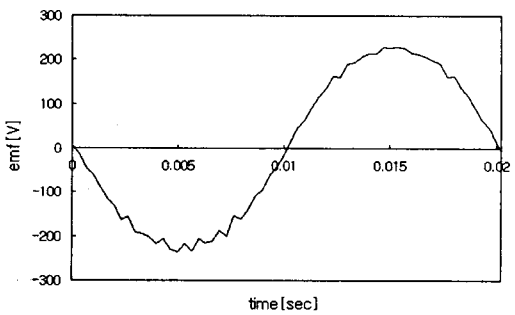


그림 4. 무부하 역기전력 (보조권선)

2.2 등가회로법을 이용한 동특성해석

그림 1의 회로로부터 주권선과 보조권선에 대한 전압, 전류 방정식을 도출한다. 그리고 보조권선 측으로 주권선의 임피던스를 변환하여 평형 2상 전동기화 한다. 회전자의 자속 축을 d축으로 정의하고, park's transform을 이용하여 d-q방정식을 얻을 수 있다. 얻어진 고정자와 회전자의 d-q축 미분방정식과 전동기의 기계적 운동방정식을 결합한 연립미분방정식을 연립하여 해를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 4계 Runge-Kutta method를 사용하여 미분방정식의 근사 해를 구하였으며, 이 과정을 그림 5에 나타내었다 [1], [2], [4].

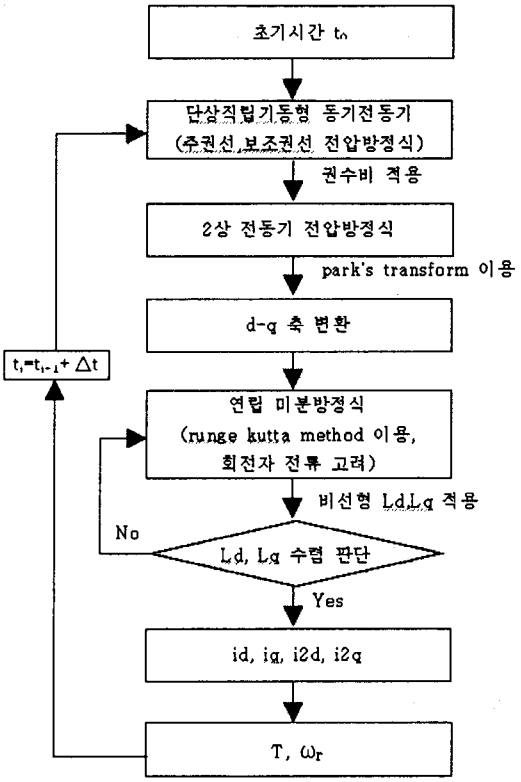


그림 5. 기동특성해석 과정

실제로 d-q축 인덕턴스는 고정자의 전류뿐 아니라 비동기 속도에서 발생하는 회전자전류에 의해서도 동시에 영향을 받는다. 본 논문에서는 다음과 같이 회전자전류의 영향을 고려하였다. 먼저 d-q축 인덕턴스는 각 축의 총 자속량의 크기에 의해 결정되며, 또한 각 축의 총 자속량은 고정자와 회전자의 d-q축 전류로부터 결정된다. 즉 모든 변수가 회전자 기준으로 변환되어있으므로, 각 축에 자속을 만드는 전류성분은 식(3)과 같이 간단히 표현될 수 있으며, 식(3)의 전류를 이용하여 그림 3으로부터 인덕턴스를 결정하였다. 비선형성의 수렴을 위해서는 초기 인덕턴스로부터 반복하여 인덕턴스를 찾는 반복법을 사용하였다.

$$i_{d_total} = i_d + i_{2d}$$
$$i_{q_total} = i_q + i_{2q} \tag{3}$$

기동콘덴서는 0.5초까지 동작하다가 운전콘덴서로 전환된다는 가정으로 해석을 수행하였다. 그림6에 토크특성을 나타내었다. 그림으로부터 약 0.2초 이내에 동기속도에 진입하는 것을 알 수 있다. 그리고 그림7과 그림8에 기동 시 d-q축 전류를 나타내었다. 또한 각 축의 인덕턴스의 변화를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 그림 9로부터 d축 인덕턴스는 기동 시에 심한 변화를 보이며 정상운전 시 인덕턴스보다 작은 값을 가지다가 0.2초 이후의 동기진입 이후에는 정상운전시보다 큰 인덕턴스 값을

갖는 것을 알 수 있다. 반면 그림 10의 q축 인덕턴스는 기동에서부터 동기진입 이후까지 정상운전시보다 작은 인덕턴스를 유지한다.

그림 11은 본 논문에서 제시한 방법으로 해석한 속도와 유한요소법으로 해석한 속도특성을 비교한 그래프이다. 그림으로부터 가속특성의 추이는 유한 요소해석과 매우 유사함을 볼 수 있다. 특히 저속구간에서 발생하는 속도 맥동특성은 유한요소해석결과와 거의 같으며 해석의 정밀도가 우수함을 나타낸다. 다만 전체적인 상승속도와 동기속도 진입후의 속도맥동특성이 상이하며 이에 대한 원인 분석이 향후 필요하다.

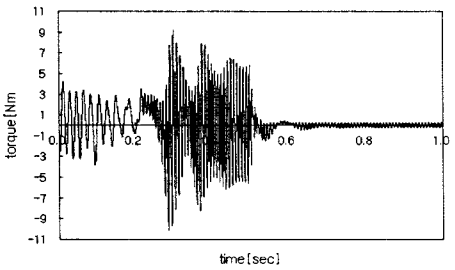


그림 6. 토크특성

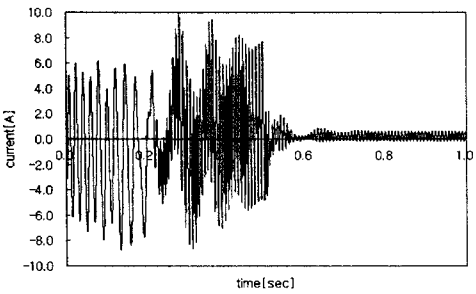


그림 7. 기동시 고정자측 d축 전류

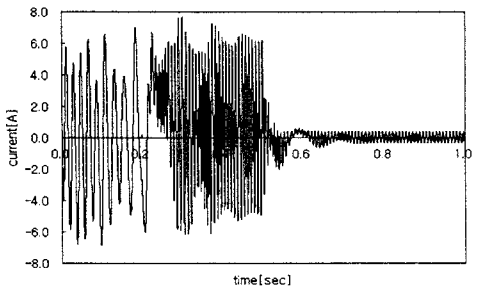


그림 8. 기동시 고정자측 q축 전류

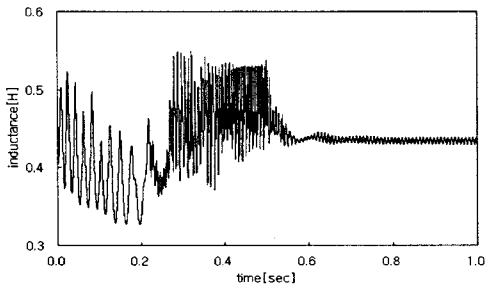


그림 9. d축 전류에 대한 d축 인덕턴스

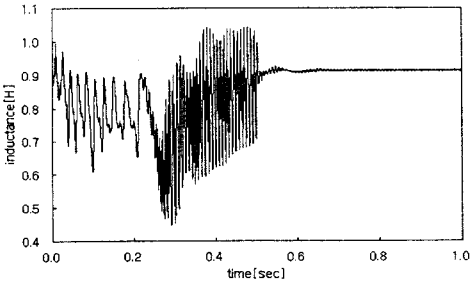


그림 10. q축 전류에 대한 q축 인덕턴스

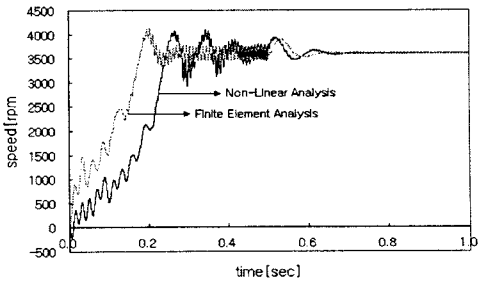


그림 11. 속도특성

3. 결 론

본 논문에서는 단상 LSPM 전동기의 기동특성해석을 하였다. 자성재료의 비선형성을 고려하기 위해 d-q축 전류변화에 따른 인덕턴스를 산정하여 기동특성 해석에 적용함으로써 기동성능 예측에 정밀도를 개선하였다. 본 논문에서 제시한 방법을 적용함으로써 향후 단상 LSPM의 설계에 비선형성이 미치는 영향을 좀 더 정량적으로 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

[1] T.J.E. MILLER, "Single-Phase Permanent Magnet Motor analysis", IEEE Transaction on industry applications, Vol. IA-21, No.4, pp.712-717, 1999

[2] T.J.E. MILLER, "Synchronization of Line Start Permanen t Magnet AC Motor", IEEE Transaction on Power Appara tus and Systems, Vol. PAS-103, No.7, July 1984

[3] SALON, "Finite Element Analysis of Electrical Machines ", 1955

[4] 강규홍, 홍정표 "단상직립기동역구자석 동기전동기의 기동 특성해석" 대한 전기 학회 논문지 vol.50, no 12, pp.592-600, 2001. 12

[5] M. Azizur Rahman, A. M. Osheiba. "Performance Analys is of Single-Phase Permanent magnet motors", Electric E nergy Conference, pp. 514-519, 1987