

매입형 영구자석 전동기의 파라미터 검증을 위한 인덕턴스 산정

이석희, 이상호, 반지형, 홍정표
창원대학교 전기공학과

The Calculation of Inductance to verify the Parameters in Interior Permanent Magnet Motor

Suk-Hee Lee, Sang-Ho Lee, Ji-Hyoung Bahn, Jung-Pyo Hong
Changwon National University

Abstract - In case of a difference exist between the experimental value and estimated value of back-emf, there can be a difference of turn number or residual flux density of permanent magnet of the motor. In order to presume the turn number, the average length for each coil is used to calculate the resistance. However in producing the motor, due to the tension of coil, the outer diameter of coil becomes smaller, and then the resistance estimated by average length for each coil is not correct. Therefore in this paper, through the comparison of experiment value and estimated value of inductance, a method of presuming the turn number and PM's residual flux density of an IPM motor is presented. The inductance of IPM motor changes with the rotor position, therefore the rotor part is taken out and then the inductance in open circuit condition is measured. In the analytical calculation, 3D FEM(Finite Element Method) is used, which can consider the leakage flux of end turns in fringing effect.

1. 서 론

전동기는 산업 전반에 걸쳐 이용되고 있으며 그 적용 범위가 점차 확대된다. 또한 사용량이 증가함에 따라 각 분야에서 요구되는 전동기 특성을 만족시키기 위한 설계 및 연구가 활발히 진행되고 있다. 설계된 전동기들은 제품화를 위한 생산 단계에 앞서 시험평가를 해야 하며 이는 제작된 전동기의 형상치수 검증 및 성능 평가 등으로 이루어진다.

제작된 전동기의 파라미터 평가를 하기 위하여 Gauss-meter를 이용한 영구자석의 잔류자속밀도 평가와 인덕턴스 및 코일의 등가길이를로부터 산정된 저항을 이용한 전기자 턴 수 평가 등이 이루어져야 한다 [1]. 매입형 영구자석(Interior Permanent Magnet, 이하 IPM) 전동기는 구조적으로 회전자의 link부에 국부적인 포화현상이 심하므로 영구자석의 특성을 정확하게 평가하기는 힘들다 [2][3]. 조립된 상태에서 인덕턴스를 이용한 전기자 턴 수를 산정하기 위해서는 먼저 영구자석에 대한 특성 분석이 이뤄져야 하며 인덕턴스는 측정 주파수에 따라 철심 재질의 철손 영향 때문에 변화하므로 주의해야 한다. 코일의 등가길이를로부터 산정된 저항을 이용한 전기자 턴 수 산정은 전동기를 제작하는 과정에서 코일에 가해지는 장력(tension)으로 인한 코일 직경이 변형되므로 쉽게 예측 할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 제작된 IPM 전동기에 대하여 자기회로가 Open circuit인 상태 즉, 고정자만 존재하는 상태에서 측정된 인덕턴스와 3차원 해석을 통해 산정된 인덕턴스를 비교·분석하여 전기자 턴 수를 산정하고 그 결과로부터 영구자석의 잔류자속밀도를 평가한다.

2. 관련 이론

2.1 인덕턴스 산정

인덕턴스의 종류에는 미분인덕턴스(differential inductance), 겹보기인덕턴스(apparent inductance), 유효인덕턴스(effective inductance)가 있으며 이는 그림 1과 같다. 여기서는 유효인덕턴스를 이용하며 이는 코일에 흐르는 전류와 저장에너지 사이의 관계에 의해 식 (2.1)을 이용하여 산정한다 [4][5].

$$L_k = \frac{2W_m}{I^2} \quad (W_m = \int_0^\lambda i d\lambda) \quad (2.1)$$

여기서, L_k , W_m , I 그리고 λ 는 각각 유효인덕턴스, 저장에너지, 전류 그리고 채교자속수이다.

2.2 저항 산정

등가길이를 이용하여 전동기의 상 저항 산정방법은 식 (2.2)와 같다.

$$R_{Tcmp} = \rho_{Tcmp} \frac{N \times 2(l_{stack} + l_{end-turn})}{S^2} \quad (\rho_{Tcmp} = \frac{1}{\sigma_{Tcmp}}) \quad (2.2)$$

여기서, σ_{Tcmp} , l_{stack} , $l_{end-turn}$ 그리고 S 는 각각 온도에 따른 도전율, 고정자

적층 길이, 코일의 엔드턴 길이 그리고 코일의 단면적이다.

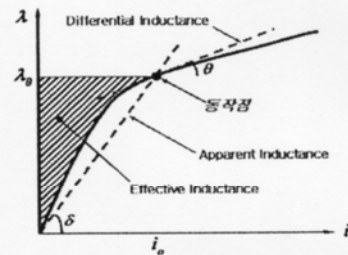
3. 본 론

3.1 대상 전동기

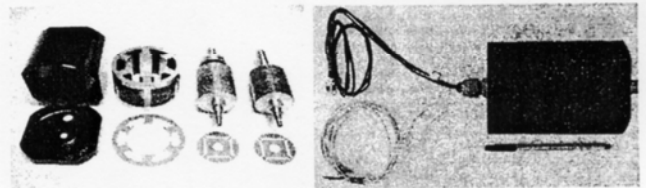
대상 전동기는 IPM type이며 그림 2와 표 1은 각각 대상 전동기의 형상 및 설계 사양을 나타낸 것이다.

표 2는 운전속도 1000rpm에서의 무부하 상 역기전력의 실험값, 해석값 그리고 식 (3.1)을 이용한 오차율(RMS Err.)을 나타낸 것이다. 실험값과 해석값 사이에는 약 16.0%의 오차율을 지니고 있으므로 대상 전동기의 상당 적열턴수 또는 영구자석의 특성이 표 1의 설계 사양과 다르다는 것을 알 수 있다. 단, 형상치수의 설계값과 측정값의 차이는 아주 미소하다.

$$RMS\ Err. = \left| \frac{Experiment - Analysis}{Analysis} \right| \quad (3.1)$$



〈그림 1〉 인덕턴스 정의



〈그림 2〉 대상 전동기 형상

〈표 1〉 대상 전동기의 설계 사양

| 항 목 | 내 용 | 항 목 | 내 용 |
|--------------|------|----------------|------|
| 철심 재질 | S23 | 잔류자속밀도 [T] | 0.43 |
| 최소 공극길이 [mm] | 0.7 | 상당적열턴수 [turns] | 320 |
| 회전자 외경 [mm] | 62.0 | 코일 직경(나선) [mm] | 0.6 |
| 영구자석 두께 [mm] | 4.0 | - | - |

〈표 2〉 무부하시 상 역기전력

| Phase | 운전속도 [rpm] | 실험값 [V _{ms}] | 해석값 [V _{ms}] | RMS Err. [%] |
|-------|------------|------------------------|------------------------|--------------|
| A | 1000 | 16.3 | 19.4 | 16.0 |

3.2 상당직렬턴수 산정

3.2.1 등가길이틀 이용한 산정

Micro-Ohm meter를 이용하여 대상 전동기 상 저항을 측정하고 그림 3과 같이 상당직렬턴수(320turns)로 가정하여 산정된 등가길이를 식(2.2)에 대입해서 한 턴 당 저항을 산정하였다. 그 결과 상당직렬턴수는 276turns으로 산정되었다.

3.2.2 인덕턴스를 이용한 산정

IPM 전동기는 회전자 위치에 따른 자기저항의 차이로 인덕턴스 값이 변화하고 다른 전동기에 비해 자기 포화가 심하므로 인덕턴스 측정 주파수에 따른 철손의 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 신뢰성 높은 인덕턴스 측정을 통한 상당직렬턴수를 산정하기 위하여 고정자만 존재하는 상태 즉, 자기적으로 Open circuit 상태를 만든다. 자기회로가 Open circuit상태에서는 자기저항이 크기 때문에 자속이 포화되지 않으므로 선형 해석으로 인덕턴스를 산정한다. 그리고 자기 fringing 효과에 의해 엔드턴에서 발생하는 자속이 크게 작용하므로 3차원해석을 수행한다.

LCR Meter를 이용하여 자기 인덕턴스 성분만을 측정하며 실험에서 입력 전원 주파수, 전압 그리고 전류 조건은 각각 100Hz, 1V_{rms} 그리고 9.7mA이다.

그림 4는 Flux-3D를 이용하여 대상 전동기의 3차원 모델 형상을 나타낸다. 해석 시간의 단축을 위하여 1/12로 모델링 하고 엔드턴에서 발생하는 자속을 고려하기 위하여 적층길이의 끝단부로부터 적층방향으로 12mm를 공기영역으로 설정하였다. 해석은 실험 조건과 동일하며 상당직렬턴수 변화에 따른 인덕턴스를 산정하였다.

그림 5는 그림 4에 나타낸 Contour line을 이용하여 치 중심에서 적층방향으로의 자속밀도분포를 산정한 결과이다. 대상 전동기의 끝단부(z=32.5mm)에서 Fringing 효과에 의한 Bx성분과 함께 엔드턴 영역에서 상대적으로 높은 자속밀도가 분포한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 적층 길이를 2배 증가시킨 가상의 모델로 산정한 인덕턴스와 그림 4의 모델에서 산정한 인덕턴스의 차로 직선영역에서의 인덕턴스와 엔드턴 영역에서의 인덕턴스로 분리하였다. 직선영역과 엔드턴 영역에서의 인덕턴스는 각각 10.23, 5.65mH로 산정되었으며 이는 자기 포화가 심하지 않기 때문에 엔드턴에서 발생하는 자속이 크게 작용했기 때문이다.

앞서 산정한 자기 인덕턴스의 해석값과 실험값으로부터 A상의 직렬턴수는 262turns로 산정된다. 이를 적용한 자기 인덕턴스 해석값과 실험값 및 무 부하 역기전력은 표 3과 같다.

3. 결 론

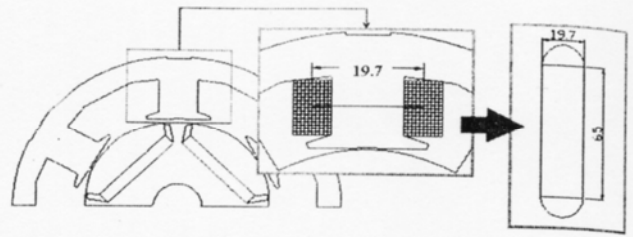
본 논문에서는 인덕턴스의 해석값과 실험값을 이용하여 상당직렬턴수를 산정하였다. 인덕턴스를 이용하여 산정된 상당직렬턴수에 의한 무부하 상 역기전력의 해석값과 실험값의 오차는 약 2.5%이다. 이 결과는 영구자석의 특성에 대한 오차를 포함하며 그 값이 매우 작아 잔류자속밀도는 표1의 설계사양과 동일하다. 자기 회로가 Open circuit이므로 3차원해석을 하였으며 엔드턴 영역에서의 자속밀도분포를 확인하고 직선영역과 엔드턴 영역에서의 인덕턴스를 산정하였다.

제작된 전동기에 대한 파라미터 검증으로 인덕턴스를 이용한 상당직렬턴수 및 영구자석의 잔류자속밀도 산정방법은 유용하게 이용될 것이다.

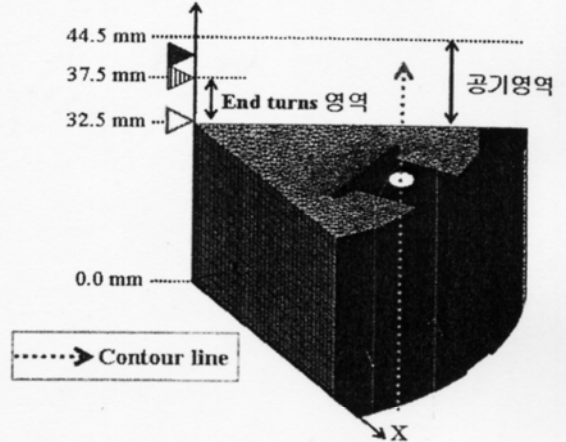
본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업
(RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다

[참 고 문 헌]

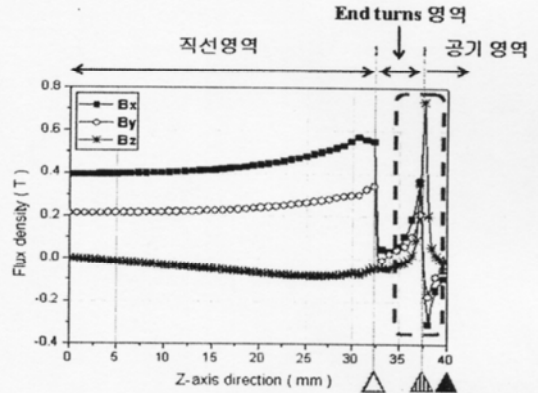
- [1] T.A. Lipo, "Intorduction to AC machine Design", *Wisconsin Power Electronics Research Center University of Wisconsin*, 1996
- [2] 강규홍, 홍정표, 김규탁. "파라미터 가변을 고려한 매입형 영구자석 동기 전동기의 특성 해석", 대한전기학회논문지, Vol.49, No7, pp.468-474, 2000.
- [3] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Jung-Woo Park. "Improved parameters modelling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor based on Finite Element Analysis", *IEEE Trans. on MAGNETICS*, Vol.36, No.4, pp.1867-1870, 2000.
- [4] Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Do-Hyun Kang. "A Study of Inductance Computations of Transverse Flux Linear Motor Considering Nonlinearity of Magnetic Material", *Key Engineering Materials*, Vols.277-279, pp391-396, 2004.
- [5] Gyu-Hong Kang, Ju-Min Lee, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Jeong-Woo Park, Jong-Mu Kim, "Analysis of inductances and torque characteristics considering saliency in IPMSM", *KIEE Summer Annual Conference*, pp167-169, 1999.



〈그림 3〉 전기자 권선의 턴 당 등가길이



〈그림 4〉 3차원 모델 형상



〈그림 5〉 Z축 길이에 따른 자속밀도분포@Contour line

〈표 3〉 인덕턴스 및 무부하 상 역기전력

| Phase | 전기자 턴 수 [turns] | 상 인덕턴스 [mH] | | 무 부하 상 역기전력 RMS[V] | | RMS Err. [%] |
|-------|--------------------|----------------|-------|-----------------------|-------|-----------------|
| | | 실험값 | 해석값 | 실험값 | 해석값 | |
| A | 262 | 15.82 | 15.88 | 16.28 | 15.87 | 2.5 |



THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS

'06

대한전기학회 제37회 하계학술대회 논문집

Proceeding of the 37th the KIEE Summer Annual Conference 2006

- 일 시 : 2006년 7월 12일(수) ~ 14일(금)
- 장 소 : 용평리조트(강원도 평창군)

B

- 전기기기
- 전력전자
- 전기교통신기술
- 신재생에너지시스템
- 친환경전기기기
- S-Session(학부생 발표)

www.kiee.or.kr

주 최 : 대한전기학회

후 원 : 한국전력공사 · 한국학술진흥재단
한국과학기술단체총연합회

| | | | |
|--------|---|---|-----|
| EMP 47 | 유한요소법을 이용한 전력용 변압기의 2차원 온도분포 예측 | 이정근, 김종경, 주수원, 한성진 | 751 |
| EMP 48 | 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크와 역률의 최대화를 위한 설계 및 해석 | 김원호, 김기찬, 원성홍, 안준선, 최승길, 이 주 | 753 |
| EMP 49 | 방열기를 갖는 유입자생식 변압기의 온도분포 해석 | 김종경, 한성진, 오연호, 박경엽 | 755 |
| EMP 50 | 전기자동차를 위한 컨프레샤용 BLDC Motor 구동드라이브에 관한 연구 | 정경수, 전장건, 최형래, 우 도, 이동현, 이상훈, 박성준, 정태욱 | 757 |
| EMP 51 | BLDC 모터 구동을 위한 신경회로망 PI파라미터 자기 동조 시뮬레이터 | 배은경, 권중동, 김태우, 김대균, 전지용, 이승환, 이훈구, 김용주, 한경희 | 759 |
| EMP 52 | 신경회로망을 이용한 IPMSM 드라이브의 온라인 파라미터 추정 | 박기태, 최정식, 고재섭, 이정호, 김종관, 박병상, 정동화 | 761 |
| EMP 53 | 단상 유도형 동기전동기의 파라미터 변화에 따른 동특성 해석 | 오세영, 정대성, 임승빈, 이 주 | 763 |
| EMP 54 | 극 수와 슬롯 수 조합에 따른 집중권 방식 매입형 영구자석 동기전동기의 Normal Force 및 설계 파라미터의 비교에 관한 연구 | 하승형, 권순오, 반지형, 정재우, 홍정표 | 765 |
| EMP 55 | BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위한 고정자 설계 | 유대일, 임승빈, 김기찬, 원성홍, 이 주 | 767 |
| EMP 56 | 실험계획법을 이용한 Magnetic suspension의 최적설계 | 정재우, 김성일, 하승형, 홍정표, 이주훈 | 769 |
| EMP 57 | 매입형 영구자석 동기전동기의 극 수 슬롯 수 조합에 따른 특성에 관한 연구 | 반지형, 권순오, 하승형, 홍정표 | 771 |
| EMP 58 | 직접 구동용 5kW AFPM 풍력 발전기 특성 해석 | 김형길, 김철호, 서영택, 오철수 | 773 |
| EMP 59 | 고효율 영구자석 릴럭턴스 전동기의 설계 및 해석 | 장 봉, 권순오, 홍정표 | 775 |
| EMP 60 | 반응 표면법을 이용한 Multi-layer 매입형 영구자석 동기전동기의 효율 향상 | 방 량, 권순오, 이상호, 장 봉, 홍정표 | 777 |
| EMP 61 | 농형 유도전동기의 회전자 바 손상에 따른 특성 해석 | 김병국, 김미정, 조윤현, 임성환, 황돈하, 강동식 | 779 |
| EMP 62 | 역기전력을 고려 한 브러시리스 전동기의 토크리플 저감에 관한 구동 방식에 대한 연구 | 손 도, 남기용, 이근호, 홍정표 | 781 |
| EMP 63 | 매입형 영구자석 전동기의 파라미터 검증을 위한 인덕턴스 산정 | 이석희, 이상호, 반지형, 홍정표 | 783 |
| EMP 64 | 전기자 권선 방법에 따른 매입형 영구자석 동기 전동기의 특성 비교 | 박수범, 권순오, 김성일, 홍정표 | 785 |
| EMP 65 | 산업용 잉크젯 플로터의 압전세라믹 헤드에 의한 드롭제어 | 최근수, 윤신용, 백수현, 김 용 | 787 |