

불평형 전원에 의해 구동되는 3상 농형 유도 전동기의 공간 자속분포 해석

조현길*, 이은웅*, 김종겸**, 김일중***, 오영수*, 이동주*

충남대학교*, 원주전문대**, 주성전문대***

The Analysis of Space Flux Distribution in Squirrel-cage Induction Motor Driving the Unbalanced Voltage

Hyun-Kil Cho*, Eun-Woong Lee*, Jong-Kyun Kim**, Il-Jung Kim***, Yung-Su Oh*, Dong-Ju Lee*

Chungnam National Univ. Won-Ju Junior College, Ju-Soeng Junior College

The paper is described the analysis of spacing flux distribution, EMF and torque pulsation in unbalanced voltage squirrel-cage induction motor using finite element method.

1. 서론

최근 전력반도체의 발전과 제어기술의 발전으로 산업현장에서 날로 급증하고 있는 3상 농형유도전동기는 단상교류전동기나 직류전동기와 달리 3상 전원으로 구동되기 때문에 상전압의 불평형이 되는 경우가 발생할 수 있다. 이와 같은 현상은 전원 전압의 불평형과, 전동기 권선의 임피던스 불평형에 의해 일어나며 이로 인해 소음과 진동이 발생함을 스펙트럼으로 해석된 바 있다.^[1] 불평형이 심해지는 경우 선간 단락 또는 단선으로 보아 고장으로 간주하게 된다. 또, 전원 전압 파형이 정현파가 아닌 구형파와 왜곡된 정현파로 인한 손실과 그와 관련된 자계현상을 Chalmer씨가 연구하였고^[2], 특히 인버터로 구동되는 전동기의 자속분포를 해석하기 위하여 텁침코일을 사용하여 철심에서의 자속흐름과 분포에 대한 연구가 있었다.^[3]

본 연구에서는 텁침코일을 이용하여 역기전력을 얻어 자속분포를 연구하는 방법과 달리 각종 고조파 발생원인을 고려한 전동기의 공간적 자속밀도와 역기전력을 시간적 변화의 관계로 해석하고 방사상 방향 토오크를 분석하므로서 전원 전압의 불평형이 소음과 진동에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 유한요소법 정식화

고조파 해석에 유한요소법을 적용하기 위하여 우선 다음과 같이 가정한다. 해석대상의 유도 전동기는 원통형으로 되어 있으나 직각좌표계를 사용하고 전류의 방향은 z 방향뿐이다.

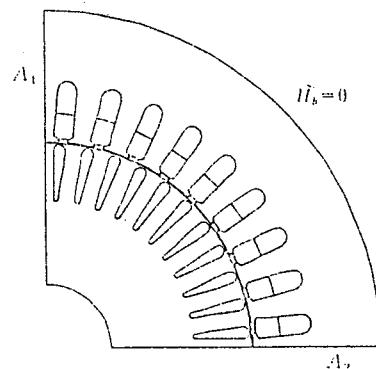


그림1. 해석모델

인가전류밀도는 J_0 이고, 전류에 의해 자계 H , 자속밀도 B , 벡터 포텐셜 \vec{A} 발생하고, 스큐(skew)는 없는 전동기의 해석영역에는 식(1)-(4)의 맥스웰 방정식이 적용된다.

$$\nabla \times \hat{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{J}}_0 \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{B}} = \mu \hat{\mathbf{H}} \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{B}} = \nabla \times \hat{\mathbf{A}} \quad (3)$$

$$\nabla \times \nabla \times \hat{\mathbf{A}} = \mu \hat{\mathbf{J}}_0 \quad (4)$$

해석영역에서 직각 좌표계로 나타낸 지배하는 방정식은 식(5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \hat{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \hat{A}}{\partial y} \right) - j\omega\sigma(\hat{A} - \bar{A}) = -\hat{f}_0 \quad (5)$$

여기서 $-j\omega\sigma(\hat{A} - \bar{A})$ 는 와전류밀도이고, 평균 자기벡터포텐셜 \bar{A} 는 해석영역의 와전류의 총 합이 0이 되는 정수로 식(6)과 같다.

$$\int j\omega\sigma(\hat{A} - \bar{A}) ds = 0 \quad (6)$$

식(5)와 식(6)의 해석영역 경계부분의 법선 성분 자계를 \hat{H}_b 라고 하면 범함수는 식(7)과 같다.

$$F = \int \frac{1}{2\mu} \left[\left(\left(\frac{\partial \hat{A}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{A}}{\partial y} \right)^2 \right) + \frac{j\omega\sigma}{2} (\hat{A} - \bar{A})^2 - \hat{f}_0 \right] ds - \int \hat{H}_b \hat{A} dl \quad (7)$$

식(7)의 변분을 명확하게 하기 위하여 식(8)의 고정경계조건을 해석모델에 적용하였다.

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial \hat{A}}{\partial n} = \hat{H}_b = 0 \quad (8)$$

식(8)은 공기와 철심이 경계를 이루고 있어 수직으로 투사하는 성분이 없음을 나타내고, 해를 구하여 임의의 시간에서 공간고조파만을 고려하면 공극의 합성자속은 극피치를 주기로 하는 공간 주기함수가 된다. 전체 해석 영역에 1/4만을 해석하기 위하여 식(9)와 같은 주기경계조건을 적용하여 였다.

$$A_2 = A_1 e^{-j\theta} \quad (9)$$

자속분포의 공간적 변화와 시간적 변화는 식(10)와 같이 알 수 있다.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (10)$$

Maxwell stress tensor를 이용하여 진동과 소음의 원인이 되는 방사상방향의 힘은 식(11)과 같다.

$$F_n = \frac{1}{2\mu_0} [(B_r^2 - B_n^2)] \quad (11)$$

여기서, B_r 는 공극의 접선방향 자속밀도이고, B_n 은 공극의 법선방향 자속밀도이다.

전원 전압의 불평형을 고려하기 위하여 공간적 자속밀도구하고, 구한 자속밀도에서 기전력을 계산하여 시간고조파를 계산하였다.

3. 해석결과

3.1 해석모델

공극의 자속밀도 분포를 해석하기 위하여 표1과 같은 저압 3상 농형 유도전동기를 해석모델로 선택하였다.

표 1 해석 모델의 사양

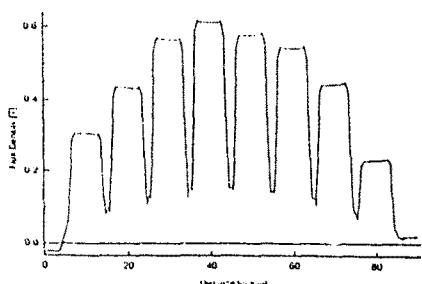
구분	규격	구분	규격
극수	4극	코일피치	#1 ~ #8
정격 출력	1.5 [kw]	고정자 내경	95.2[mm]
정격 전압	220[V]	회전자 외경	94.6[mm]
정격 전류	6.2[A]	고정자 슬롯의 개방폭	3.5[mm]
입력주파수	60[Hz]	정격회전수	1780[rpm]
고정자 슬롯수	36	회전자도체수	44
코일당 턴수	33	공극의 길이	0.3[mm]

3.2 해석 결과

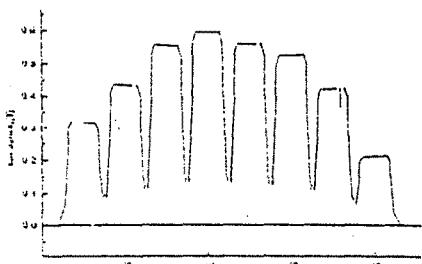
그림 2.a는 3상 평형 전원 전압을 인가한 공극의 자속밀도 분포이다. 공극의 자속밀도가 정현적 분포를 하지 않고 골과 산을 가지는 것은 고정자 치와 슬롯 때문에 치부분은 자속밀도가 높게 되고 슬롯부분은 자속밀도가 낮게되기 때문이다.

A, C상의 전압은 정격전압이 인가되었고, B상은 정격전압의 90% 전압이 인가된 불평형시의 자속밀도분포는 그림 2.b와 같으며, 그림3.a와 b는 시간과 공간적으로 동일한 위치에서의 자속분포로서 비교가 가능하다.

그림2.b와 그림3.b는 불평형 전원 전압 상태로서 B상 권선에 속하는 치부분의 자속밀도를 나타낸 것으로 평형전원 전압상태의 그림2.a보다 1/6만큼 증가하였고, A, C상에 속하는 치 아래

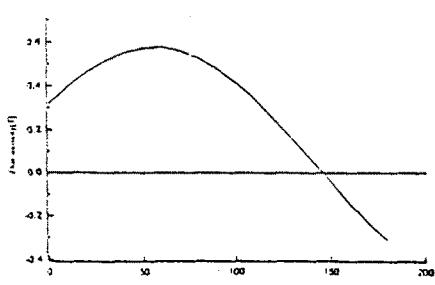


a. 전원 전압의 평형시



b. 전원 전압의 불평형시

그림 2. 공극의 자속밀도 분포



a. 전원전압의 평형시



b. 전원 전압의 불평형시

그림 3. 토오크의 변화

의 자속밀도 1/6만큼 감소하였다.

방사상 방향 힘은 법선방향 성분 자속밀도 자승에 비례하여 A상과 C상 권선 영역내에 있는 치 부분에서 변화가 전원 전압의 평형시보다 0.17 감소되고, B상 권선 영역내에 있는 치에 힘은 0.17만큼 증가 되었다.

그림3.a와 b는 같은 위치에서 시간적으로 변화하는 자속밀도이다. 그림3.a는 평형 전원전압으로 자속밀도가 정현적으로 변화하여 기전력이 정현적으로 나타나고, 그림3.b는 전원전압이 불평형인 경우로서 자속밀도 변화가 정현적이지 아니하고 왜곡되어 제 5고조파 성분이 함유되어 있다.

방사상 방향 힘은 전원 전압이 평형인 경우 정현적으로 변화하고, 불평형인 경우에는 방사상 방향 힘 제 5고조파 성분이 많이 포함되게 된다. 전원전압이 평형인 경우는 축을 중심으로 균형을 이루지만, 전원 전압이 불평형인 경우에 전원전압이 낮은 권선 영역에 속하는 치의 자속밀도가 높아져 진동과 소음이 유발된다.

4. 결론

본 연구에서는 전원 전압의 평형시와 불평형시 전동기의 공극 자속분포를 해석하여 방사상 방향 힘의 분포를 해석하고, 방사상 방향 힘의 변화를 시간적으로 분석하여 전원의 불평형이 진동과 소음에 미치는 영향을 정량적으로 해석 할 수 있음을 입증하였다.

참고 문헌

1. T.W.Chow, Gou Fei, "Three phase induction machines Asymmetrical Faults Identification Using Bispectrum ", IEEE Trans on Energy conversion, Vol.10. No.4 pp. 688 - 693, 1995
2. Chalmers, B.R. Sarkar, "Induction motor losses due to nonsinusoidal supply waveform", PRO. IEE. VOL.115. NO. 12. pp. 1777-1782, 1968.
3. 夏園王人 , “インバータ 駆動下に おける 3相かご形 誘導電動機の 磁界解析と 實驗的 檢討”, JIEE D, VOL. 108, NO. 9, pp.821-828, 1988