

대형 회전기 Axial Magnetic Force 해석

이정일, 김기찬, 권중록, 제준모*
 현대중공업 기계전기연구소 전력기기연구실, *현대중공업 전전시스템사업본부 회전기설계부

The Analysis of the Axial Magnetic Force for Large Rotating Machines

Jung-il Lee, Ki-Chan Kim, Jung-Lock Kwon, Jun-Mo Jae
 Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd

Abstract - A characteristic of the rotating machine that has been receiving relatively little attention is the axial force on the rotor versus its axial displacement from magnetic neutral position. A knowledge of this force is essential to the economic application of thrust bearings for rotating machine and their connected loads. In this paper this axial force is analyzed and calculated and test values are verified with two different machines.

또한, 공극자속이 일정 한 경우 자화전류는 공극 퍼미언스에 반비례하므로 전자기력은 식 3과 같이 된다.

$$F_x = \frac{1}{2} a \frac{I_m E_o}{w l_o} \left(\frac{l_o}{l} \right)^2 \left(\frac{\partial l}{\partial x} \right) \quad (3)$$

E_o : 중성점 위치 유기전압(V), w : 각속도

l_o : 중성점 위치에서 유효 철심장(inch)

식 3에서 $\frac{\partial l}{\partial x}$ 은 유효길이 변화로 한정된 범위의 값을 갖으며 회전기의 구조에 의해 결정된다.

1. 서 론

회전자가 축 방향으로 이동하여 자기 중심점(magnetic neutral position)의 불일치로 발생하는 축 방향 전자기력의 영향은 축 방향 추력을 받는 트러스트 베어링 또는 축 방향 하중에 대한 허용능력이 없는 슬리브(sleeve) 베어링을 사용하는 대형 회전기에서 필수적으로 고려되어야 한다.

여기서는, 퍼미언스 법에 의한 축 방향 전자기력의 계산 방법과 수치해석 법에 의한 해석방법을 고찰하고, 슬리브 베어링을 사용하는 대형 회전기를 대상으로 전자기력을 해석하여 시험치와 비교를 통해 그 영향을 평가한다.

2. 본 론

2.1 Axial Magnetic Force 계산이론

회전자가 축 방향으로 이동하면 공극 퍼미언스의 변동으로 고정자와 회전자 간의 철심단부의 불일치, 덕트 에지(edge)면의 불일치, 고정자 또는 회전자의 스퀁(skew)에 의한 축 방향 전자기력이 발생된다.

2.1.1 Axial Magnetic Force 유도

회전자의 축 방향 변위에 의한 전자기력은 가상변위법으로 계산되며, 계산조건은 다음과 같다.

- 1) 회전자 권선의 전류는 무시한다.
 - 2) 철심은 이방성이고 무한대의 투자율이고, 철심단부의 와전류 영향은 무시한다.
 - 3) 엔드 권선의 전류에 의한 영향은 무시한다.
- 일반적으로, 변위에 의한 고정자의 누설 인덕턴스 변화는 매우 작으므로, 누설 인덕턴스를 무시한 경우의 전자기력은 식 1과 같이 된다.

$$F_x = \frac{1}{2} a I_m^2 \left(\frac{\partial L_m}{\partial x} \right) \quad (1)$$

F_x : 전자기력 (pounds), a : 상수

I_m : 자화전류 (A), L_m : 상호인덕턴스 (henrys)

상호 인덕턴스는 턴수의 제곱과 자기회로 면적에 비례하고, 자기회로 길이는 반비례하므로 변위에 대한 전자기력은 식 2와 같이 된다.

$$F_x = \frac{1}{2} a I_m^2 \frac{L_m}{l_o} \left(\frac{\partial l}{\partial x} \right) \quad (2)$$

l : 철심장 유효길이 (inch)

2.1.2 철심단부의 유효길이 변화

회전기의 철심단부는 그림 1과 같으며, 축 방향 변위(h/g)에 대한 유효길이 변화비는 식 4와 같고, 그림 2의 "ENDS"로 표시된 곡선의 형태로 된다.

$$\left(\frac{\partial l}{\partial x} \right) = - \left[1 - \frac{2}{\pi} \text{ctn}^{-1} \left(\frac{h}{g} \right) \right] \quad (4)$$

h : 축 방향 변위 (inch), g : 공극길이 (inch)

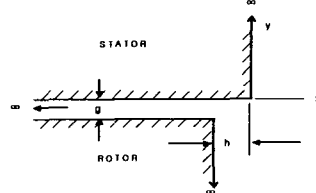


그림 1. 철심단부 구조

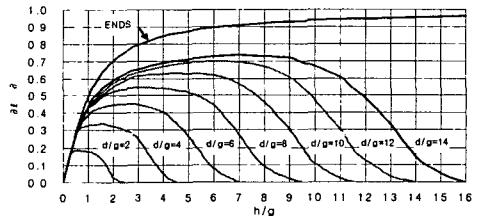


그림 2. 축 변위에 의한 유효길이 변화곡선

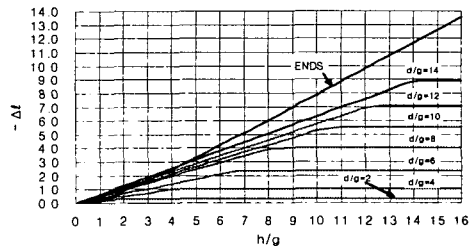


그림 3. 축 변위에 의한 유효길이 감소곡선

또한, 축 변위에 의한 철심장의 보정($\frac{\Delta l}{g}$)은 식 3을

$$\left(\frac{\Delta l}{g}\right) = -\left(\frac{h}{g}\right) \left[1 - \frac{2}{\pi} \text{ctn}^{-1}\left(\frac{h}{g}\right) + \frac{1}{\pi} \log_e \left[1 + \left(\frac{h}{g}\right)^2\right]\right] \quad (5)$$

철심장 보정을 통한 유효길이 감소분은 다음과 같고, 변화곡선은 그림 2의 "ENDS" 곡선과 같이 된다.

2.1.3 덕트에서 유효길이 변화

냉각 덕트에서 축 변위에 의한 자속분포 현상은 철심 단부보다는 복잡하여 유효길이 변화는 수식적으로 쉽게 계산 될 수 없기 때문에 그림 5와 같은 덕트 구조에 대해 축 변위와 덕트길이 변화에 따른 퍼미언스 시험결과로부터 도출 된 연구결과^[11]를 적용하였다.

그림 5의 해석모델에서 1번과 2번 영역간에 저항을 측정하여 덕트와 축의 변위에 의한 유효길이 변화비를 식 6과 같이 계산한다.

$$\frac{\partial l}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial R}{\partial \left(\frac{h}{g}\right)} \quad (6)$$

R : 저항(ohm), ρ : 저항률(Ω/mm^2)

또한, 철심장 보정을 통한 감소분은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta l}{g} = \frac{R - R_0}{\rho} \quad (7)$$

축 방향 변위에 의해 각 덕트(d/g)에 대한 유효길이 변화비와 유효길이 감소 값은 그림 2, 3과 같다.

2.1.4 슬롯의 스큐(Skew)에 의한 Axial Force

슬롯의 스큐(skew)는 스큐와 회전자 전달토크에 비례하는 축 방향 힘을 발생시킨다.

스큐는 공극에서 축 방향 위치에 따른 공극 기자력을 변화시키며, 공극 기자력이 최대로 되는 끝단 방향으로 힘을 발생시키며, 힘의 크기는 식 8과 같다.

$$F_{ax} = -\frac{1}{2} \left(\frac{2}{D}\right) T (\tan \theta_{sk} + \tan \theta_{sk}') \quad (8)$$

D : 전기자 직경(inch), T : 토크, θ : 스큐각(rad.)

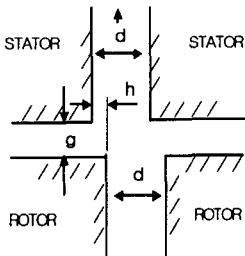


그림 4. 덕트구조

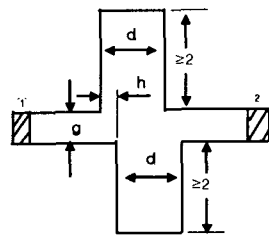


그림 5. 해석모델

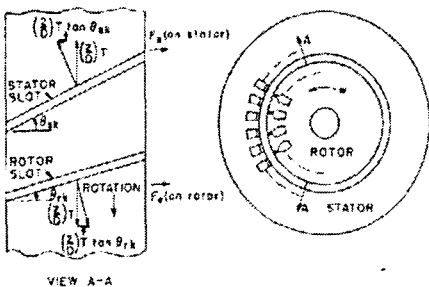


그림 6. 스큐 된 경우의 전지력 발생분포

2.2 Axial Magnetic Force 해석

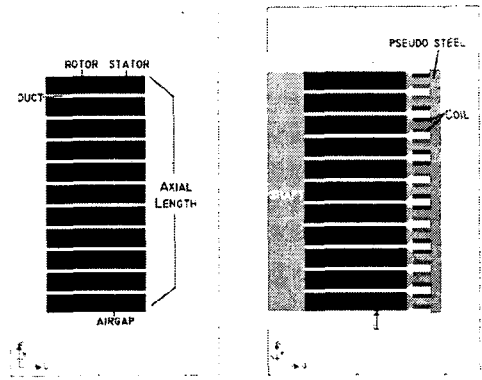
2.2.1 모델사양 및 해석방법

여기서는, 그림 7의 a)와 같이 축 방향 전자기력에 영향을 주는 철심,덕트 및 공극은 실제치수와 동일하게 하고, 그림 7 b)와 같이 실제의 공극 자속밀도가 분포되게 가상코어와 코일로 모델링 하여 해석하였다. 해석 모델은 슬리브 베어링을 사용하는 대형 발전기와 전동기로 사양은 표 1과 같다.

2.2.2 축 방향 전자기력 해석

축 방향 전자기력은 축 방향 변위의 자속밀도 변화에 대해 Maxwell Stress Tensor법으로 계산하였다.

축 방향 변위에 따른 해석모델의 자속밀도 분포는 그림 8과 같이 철심단부와 덕트에서 프린팅 자속이 발생됨을 알 수 있다.



(a) 근사 모델 (b) 2D FEM
그림 7. 2D FEM 해석 모델링

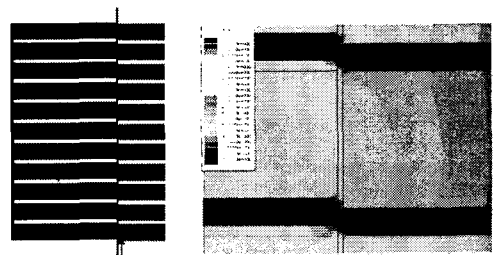


그림 8. 자속밀도 분포(변위 4 mm)

표 1. 축 방향 전자기력 해석모델 사양

정격	1600 kW @ 720 rpm	1,250 HP @ 3600 rpm
극수	10 극	2 극
전원	450 V, 60 Hz	6.6 kV, 60 Hz
베어링 종류	Sleeve	Sleeve
공극자속밀도	0.64 T	0.73 T
철심장	650 mm	530 mm
공극길이	3.0 mm	2.2 mm
덕트 수	고정자	11 EA
	회전자	11 EA
덕트 폭	고정자	10 mm
	회전자	10 mm
Duct 배열	align	misalign

그림 9, 그림 10의 해석결과와 같이 전자기력은 변위와 자속밀도가 증가 할 수록 증가하고, 공극 퍼미언스가 최대가 되는 변위에서 최대가 된다. 주목 할 점은 공극 퍼미언스는 덕트 배열에 따라 변동한다. 즉, 740 kW 발전기와 같이 정렬 된 덕트는 덕트 폭의 45~50% 변위, 1,250 HHP 전동기와 같이 어긋난 배열은 철심 중심을 기준으로 축 변위에 따라 자속의 방향이 반대가 되어 전자기력이 서로 상쇄되기 때문에 덕트 폭의 10~15% 변위에서 퍼미언스 변화가 최대로 된다.

2.3 덕트 배열에 따른 축 방향 전자기력 해석

덕트 배열에 따른 특성 비교는 1250 HHP 전동기를 대상으로 그림 11과 같이 3가지 덕트 배열에 대해 동일한 공극 자속밀도(0.72 T)에서 해석하였다.

해석결과, 어긋 난 배열은 축 변위에 따른 자속상쇄 효과로 정렬 배열에 비해 전자기력이 4배이상 감소하며, 배열조건에 따라 그림 11의 a), c)와 같이 변동된다. 전자기력만을 고려한 경우 어긋난 배열이 최적구조이나, 통풍 저항의 증가에 의한 냉각문제가 발생 될 가능성이 있으므로 냉각성능을 고려하여 덕트 배열이 결정되어야 한다.

2.3 Axial Magnetic Force 시험

2.2절에서 검토된 1,600 kW 10극 발전기에 대해 계측기의 한계 값(4,900N)이내에서 축 방향 전자기력을 시험하였으며, 해석결과와 비교한 결과는 그림 14와 같다.

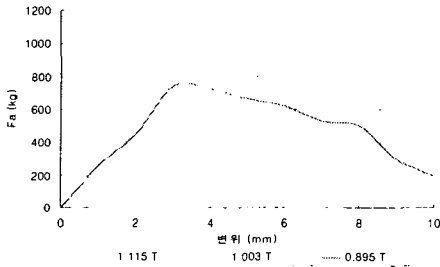


그림 9. 발전기 축 방향 전자기력

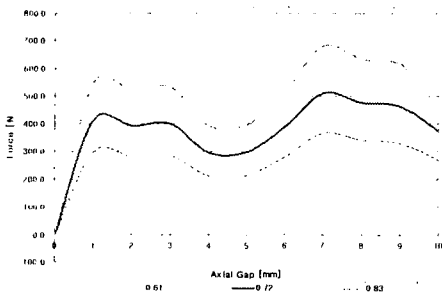


그림 10. 전동기 축 방향 전자기력

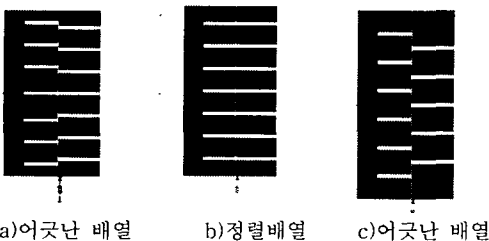


그림 11. 덕트 특성 비교모델

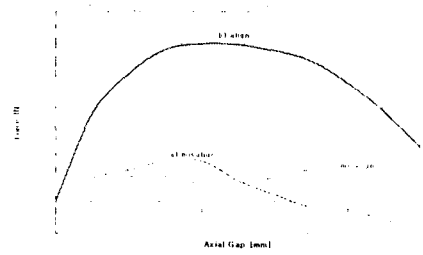


그림 12. 덕트 배열에 따른 축 방향 전자기력 비교

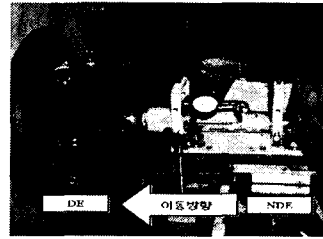


그림 13. 축 방향 전자기력 시험

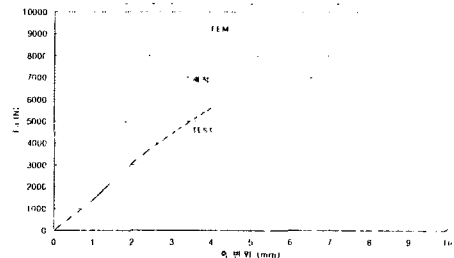


그림 14. 시험결과와 해석결과 비교

시험결과, 시험치는 해석치의 약 60 % 수준으로 이는 회전기의 고정자와 회전자 간의 반경방향 편심을 발생되는 자기적 불평형력에 의해 축 방향 전자기력이 감소 된 것으로 보인다. 또한, 1,600 kW 발전기의 베어링 허용하중은 1,050 N으로 시험치 기준 한 최대 축 방향 허용변위는 최대 1.6 mm임을 확인하였다.

3. 결 론

본 과제에서는 회전자의 축 변위에 의한 축 방향 전자기력 계산 기술의 고찰과 1600kW 동기발전기와 1250 마력 전동기를 대상으로 전자기력 특성을 평가하였다.

- 1) 축 방향 전자기력은 공극 퍼미언스 변화가 최대로 되는 변위에서 최대가 되며, 대형 회전기의 냉각덕트 배열 전자기력 특성이 변동 됨을 확인하였다.
- 2) 1,600 kW 발전기 축 방향 전자기력 시험치는 해석치의 60% 정도로서 반경방향의 자기불평형력에 의한 영향으로 보인다.
- 3) 축 방향 전자기력에 대한 시험결과를 기준으로 슬리브 베어링의 축 방향 허용하중과 변위를 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] I. C.E. B.Radford, R.G. Rhudy, "Axial Magnetic Forces on Induction achine Rotors", AIEE Paper 53 124, 1953, pp 488 494.
 [2] Subrahmanyam, V. "Axial Forces in Induction Motors with Skewed Slots."Proc. IEE 122 (1975), S. pp 149 153
 [3] 이정일의 2. "대형회전기 Radial & Axial Force 계산", 현대중공업 연구보고서, HEMIRI 03 AB 060.2003