

Gearless 터보기기용 200[kW], 30000[rpm] 유도전동기 설계 및 특성 해석

조원영* · 우경일** · 조운현†

(원고접수일 : 2006년 1월 9일, 심사완료일 : 2006년 4월 11일)

Design and Characteristic Analysis of an 200[kW], 30000[rpm] Induction Motor for Gearless Turbo Machine

Won-Young Jo* · Kyung-Il Woo** · Yun-Hyun Cho†

Abstract : This paper describes design and characteristic analysis of the 200[kW], 3000[rpm] induction motor for gearless turbo machine. It was designed by the loading distribution method and the results of characteristics obtained by the equivalent circuit method are compared with the results of circle diagram. To verify the validation of design 2D finite element method is used and also 3D finite element method is used to calculate the current density curve of the rotor bars when they are broken.

Key words : Circle diagram(원선도법), Finite element method(유한요소법), Gearless turbo machine(기어리스 터보 기기), Loading distribution method(장하분배법).

기호설명

Φ : 한 극당 자속 [Wb]
 Φ_m : 한 극당 최대 자속 [Wb]
 e_1 : 한 상당 유기 기전력 [V]
 E_{ph} : 정격 전압시의 한 상당 기전력 [V]
 I_{ph} : 전기자 권선 1상당 정격 전류 [A]
 VA : 한 상당 입력 용량 [VA]
 S : 한 극당 용량 [VA]
 P : 전동기 극 수

mN_{ph} : 전기자 전 도전수
 f : 입력 주파수 [Hz]

1. 서 론

생산성이나 제품의 품질을 개선해야 할 필요성에 의해, 공작기계의 스피들 구동용 또는 터보 분자 구동용 모터 부문과 소형화, 경량화가 요구되는 산업분야에서 고속회전 전기기계의 구현이 요망되고 있다. 고속회전기가 실현되면 기기 자체가 소형화, 경량화 될 뿐만 아니라 증속 기어 없이 고속 킴프레스를 직

† 책임저자(동아대학교 전기공학과), E-mail: yhcho@dau.ac.kr, Tel : 051) 200-7742

* 조원영(동아대학교 전기공학과)

** 우경일(부경대학교 전기제어계측공학부)

결할 수 있으므로 시스템의 소형화, 경량화, 고효율화를 이룩하는 한편 유지보수작업이 거의 필요 없게 되기 때문이다. 산업의 첨단화로 전기·전자 산업, 정밀 화학 산업, 첨단기계 산업에 수요의 확대로 시장의 전망이 매우 밝으며 전동기의 고속화 기술과 전력변환 기술이 발전됨에 따라 고속 터보기기를 증속기어 없이 고속전동기로 직접 구동하는 기술이 점점 현실화되고 있다. 현재 국내 압축기 분야는 세계적 기술을 보유하고 있지만 기존의 공기압축기를 고속 회전기로 대체 하였을 경우 시스템의 효율이 약 10%이상 상승하게 되고 기기 시스템 자체의 소음도 대폭으로 감소되며 기존의 기기가 고속기로 대체되면 부피가 약 1/10로 줄어들어 소형화, 경량화 되는 등 많은 장점을 지니고 있어 현재 선진국에서는 많은 연구투자를 하고 있는 부분 중의 하나이다.

따라서 본 논문에서는 200[kW] 3000[rpm] 터보기기 기어리스 구동용 유도전동기 설계 및 특성해석에 관해서 설명한다. 장하 분배법^[1]을 이용하여 유도전동기를 설계 한 후 등가회로법을 이용하여 특성해석을 실시하고, 실 부하법 특성 실험이 불가능하므로 원선도법을 이용하여 구한 특성 해석 값을 등가회로법을 이용한 특성 해석 결과값과 비교한다^{[2]-[4]}. 그리고 설계의 타당성을 보다 정확히 확인하기 위하여 2차원 유한요소 상용 프로그램을 이용한 특성 해석을 하고 결과 값을 설계 값과 비교 검토한다. 고속 회전운동을 하는 가변속 전동기의 회전자와 고정자에서 발생하는 공극 자속의 파형은 진동과 소음을 최소화하기 위해서는 분석되어야 한다^{[5]-[7]}. 공극 자속 형태는 슬롯의 형태, 특히 슬롯 개구폭과 슬롯결합이 중요한 설계 변수가 되므로 설계된 유도전동기의 자기적 특성을 정확하게 고찰하기 위해서는 3차원 유한요소 해석 기법 확립이 중요하다. 3차원 유한 요소해석 기법을 확립하기 위해서 설계된 유도 전동기의 회전자 바의 단락사고에 대한 특성 해석을 상용 프로그램을 사용하여 시행하고 결과를 검토한다.

2. 유도전동기 설계 및 특성 해석

2.1 유도전동기 설계

전동기의 설계방법은 주요치수와 장하비의 관계

를 이용한 체적법과 미증가 비례법에 의한 장하분배법이 널리 이용되고 있다^[1]. 체적법은 구미에서 유래된 방법으로 전기 및 장하비와 출력계수를 이용하는 방법이며 장하분배법은 일본에서 유래된 것으로 미증가 비례법을 이용한 장하분배 계수를 사용한 방법이다. 이 두 방법 모두 각기 장단점을 지니고 있으며 설계자의 선호에 따라 선택되어지고 있다. 본 논문에서는 전동기 설계에 기초가 된 장하분배법을 이용하여 유도전동기를 설계한다.

2.1.1 유도전동기 유기 기전력

유도전동기 1극 당 자속은 다음 식과 같다.

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t \quad (1)$$

유기 기전력은 다음 식으로 유도된다.

$$e_1 = -d\frac{\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \sin \omega t \quad (2)$$

E_{ph} 를 정격전압시의 1상의 기전력이라 하고 I_{ph} 를 전기자 권선 1상의 정격전류 [A]라 하면 3상 전체의 용량은 다음과 같다^[2-4].

$$\begin{aligned} (kVA)_{input} &= 3E_{ph}I_{ph} \times 10^{-3} \\ &= 2.1(3N_{ph}I_{ph})\Phi f \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (3)$$

2.1.2 장하분배

교류 전동기의 구조에 대하여 고찰하여 보면 유도기는 4극의 경우 전체의 1/4 즉, 1극분을 단면으로 표시하면 나머지 부분은 이것과 구성이 같은 것 3개로 이루어져 있는 셈이다. 즉 교류기에서는 매극의 구조가 같기 때문에 1극에 대한 설계를 생각하면 된다. 그래서 1극당의 용량을 S , 극수를 P 라 하면 (3)을 P 로 나누면 다음과 같다^[1].

$$\begin{aligned} S &= \frac{(kVA)_{input}}{P} \\ &= 2.1 \left(\frac{mN_{ph}I_{ph}}{P} \right) \Phi f \times 10^{-3} [kVA] \end{aligned} \quad (4)$$

(4)에서 $mN_{ph}I_{ph}$ 는 전기자 주변에 분포되는 전도선수 mN_{ph} 와 1상의 정격전류 I_{ph} 의 곱인 전기자

의 전 암페어 도선수이다. 그리고 $\frac{mN_{ph}I_{ph}}{P}$ 는 1극 당의 암페어 도선수이고 이를 다음과 같은 AC (Ampere Conductor)로 나타내며 이를 전기장하 (Electric Loading) 라 한다.

$$AC = \frac{mN_{ph}I_{ph}}{P} \quad (5)$$

(5)를 정리하면 다음 (6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{S}{f \times 10^{-2}} = 2.1 (AC \times 10^{-3}) (\Phi \times 10^2) \quad (6)$$

여기서 $\frac{S}{f \times 10^{-2}}$ 를 교류기의 비용량 배 100 사 이클 또는 단지 비용량(Specific Capacity)이라 하고 AC 를 전기장하, Φ 를 자기장하라 하며 비용량은 전기장하와 자기장하의 곱에 비례한다.

한편 용량과 치수의 관계는 각 부분의 치수가 n 배가 되면 전기장하 및 자기장하는 모두 n^2 배가 되어 서로 비례해서 증가한다. 따라서 동손 및 철손은 모두 체적당이므로 n^3 배가 되어 슬롯 내에 있는 코일은 온도 상승이 급격하게 된다. 이 때문에 전기장하의 증가율을 자기장하의 증가율 보다 적게 할 필요가 있다. 즉, 위의 (6)에서

$$\frac{\Phi \times 10^2}{(AC \times 10^{-3})^r} = C: \text{정수} \quad (7)$$

이 되도록 r 을 1보다 크게 잡을 필요가 있다. $r = 1$ 이란 것은 자기장하와 전기장하의 비가 용량에 상관 없이 일정하다는 것을 의미한다. 이를 일반적으로 말 하면 회전기에서는 $(\Phi \times 10^2)$ 와 $(AC \times 10^{-3})$ 의 비가 정수 C가 되도록 장하분배를 하여야 하며, r 은 1보다 큰 값이어야 하며 유도기, 동기기, 직류기 등 기종에 따라 그 값이 다르다. (6)으로 전기장하와 자기장하의 곱이 주어지고 (7)로 양자의 비가 주어지므로 양식을 연립시켜 Φ 및 AC를 구하면 장하분배를 행할 수가 있다. 이상과 같은 장하 분배 방법으로 설계된 시작품의 설계결과를 표 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of designed induction motor

*** 고속 전동기 설계 사양 ***		
1	정격출력	200 [kW]
2	극수	2 [poles]
3	주파수	500 [Hz]
4	정격전압	380 [V]
*** 고정자 권선 ***		
5	고정자권선내경	1.3 [cm]
6	고정자권선외경	1.35 [cm]
7	고정자결선방법	Y
8	절연	
	슬롯절연(Cell)	0.015 [cm]
	층간절연(TMS)	0.015 [cm]
*** 고정자 사양 ***		
9	고정자 Slot-opening (ES)	0.0 [cm]
10	고정자 Slot 상부폭 (A1S)	1.36 [cm]
11	고정자 Slot 하부폭 (A2S)	1.89 [cm]
12	고정자 Slot 치끝단깊이 (DS)	0.05 [cm]
13	고정자 Slot 입구깊이 (CS)	0.68 [cm]
14	고정자 Slot 사다리꼴부분깊이 (BS)	2.02 [cm]
15	고정자 Slot 총깊이 (PS)	3.64 [cm]
*** 회전자 사양 ***		
16	회전자 Slot-opening (ER)	0.18 [cm]
17	회전자 Slot 상부폭 (ER)	0.61 [cm]
18	회전자 Slot 하부폭 (ER)	0.61 [cm]
19	회전자 Slot 치끝단깊이 (ER)	0.18 [cm]
20	회전자 Slot 입구깊이 (ER)	0.2 [cm]
21	회전자 Slot 사다리꼴부분깊이 (ER)	0.74 [cm]
22	회전자 Slot 총 깊이 (ER)	1.32 [cm]

2.2 등가회로법을 이용한 특성 해석

등가회로법에 의한 특성 해석은 그림 1과 같이 구성된 해석 알고리즘을 이용하였으며 그림 2는 해석 결과를 나타낸다. 그림 2 (a)는 출력 특성 곡선으로서 정격속도가 30,000[rpm]이지만 0.46[%] 슬립으로 인하여 약 29,862[rpm]에서 정격출력인 200[kW]가 잘 나오며 최고 출력값은 451.5[kW]로 정격대비 약 2.3배 정도 나오고 있음을 알 수 있다. 그림 2 (b)는 시작품 토크 특성 곡선으로서 정격시 약 64[N·m]가 나오며, 최대토크는 슬립 2.4[%]에서 약 147.3[N·m]로 정격대비 약 2.3배 정도 나오며, 기동토크는 약 24[N·m]로 정격대비 0.38배 정도 나오고 있음을 알 수가 있다. 그림 2 (c)와 (d)그림은 시작품의 효율과 역률 특성곡선으로서 정격점에서 효율

은 약 91.2[%], 역률은 약 89.7[%]로 설계치를 만족함을 알 수가 있다. 그림 2 (e)는 전류 특성 곡선으로서 정격점에서 약 405[A]이며, 무부하 전류는 약 82.6[A]가 흐를 수 있다. 이상의 등가회로 특성해석에서 알 수 있는 바와 같이 특성해석 결과 설계치를 잘 만족하고 있음을 알 수가 있다.

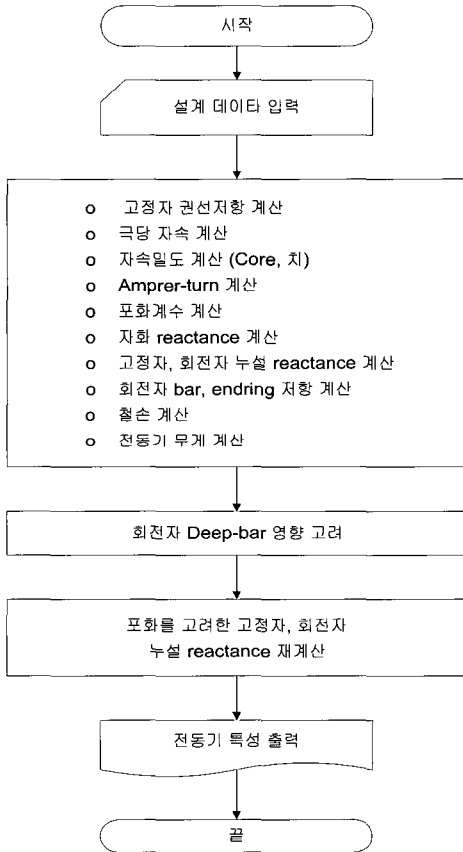
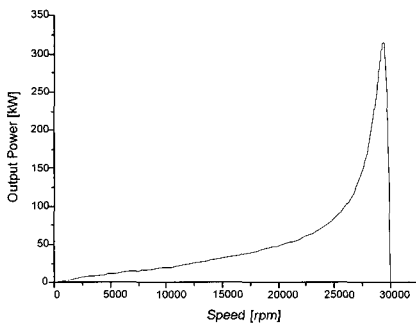
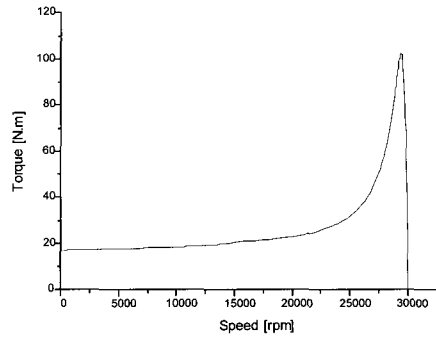


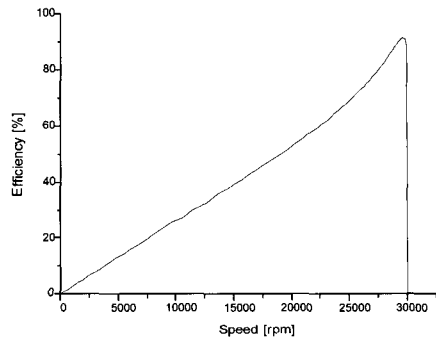
Fig. 1 Analysis algorithm



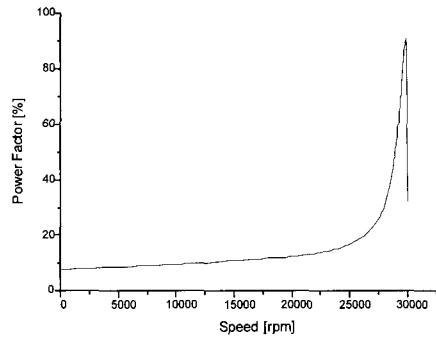
(a) Power curve



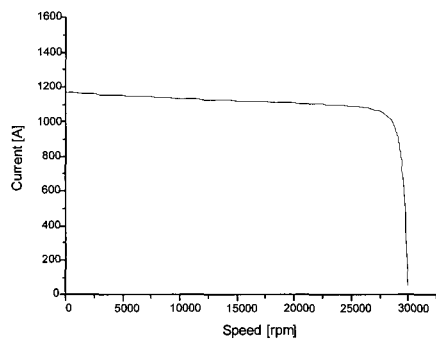
(b) Torque curve



(c) Efficiency curve



(d) Power factor curve



(e) Current curve

Fig. 2 Characteristic curves

2.3 원선도법을 이용한 특성 시험

표 2는 전동기의 무부하 시험과 구속시험 결과이다. 무부하 시험은 출력이 발생하지 않는 상태에서 행하여지는 시험으로 이 시험을 통해 고정자 측에서 발생하는 자화성분의 정수값을 추출할 수 있다. 이 때 측정되는 입력 P는 동손과 기계손에 대한 손실분이 되며 전류는 유효분과 무효분으로 나누어 원선도 작도시 이용하게 된다^[2]. 표 3은 원선도법을 통해 얻어지는 전동기 특성값이며 등가회로법을 이용한 특성 결과값과 비슷함을 알 수 있다.

Table 2 No load test and lock test results

*** 무부하 시험 ***		
무부하손		12,500 [W]
정격전압		0351 [V]
		83 [A]
무부하전류	유효전류	19.99 [A]
	무효전류	80.56 [A]
*** 구속시험 ***		
구속시험시 구속입력		4210 [w]
구속시험시 인가전압		76 [V]
		1838.13 [A]
정격전압시 구속전류	유효전류	144.55 [A]
	무효전류	1832.44 [A]

Table 3 Results of circle diagram

전부하 유효전류분	328.97 [A]
1차 동 손 전 류	32.93 [A]
2차 동 손 전 류	91.63 [A]
정 격 1차 전 류	382.67 [A]
역 률	0.9241
효 율	0.9303
2차 동 손	2088.31 [W]
무 부 하 손	12150.00 [W]
전 손 실	14988.81 [W]
전 부 하 출 력	202088.31 [W]
전 부 하 토 크	64.33 [N.m]
최 대 출 력	498515.59 [W]
최 대 토 크	167.19 [N.m]

2.4 유한 요소법에 의한 특성 해석

2.4.1 2차원 유한요소해석

본 논문의 고속 유도 전동기는 2극기이므로 그림

3과 같은 1/2 모델을 모델링하여 유한 요소해석을 하였다. 유한 요소 해석은 Ansoft 사의 Maxwell 2D 을 이용하였으며, 과도 해석을 위하여 EMpulse 모 들을 사용하였다. 해석방법은 회전자가 정격시의 슬 립(slip=0.005)이 발생하는 것으로 가정하고, 전원 이 인가될 때 회전자에서 발생하는 토크와 권선전 류의 변화를 관찰하기로 한다. 회전자의 슬립은 실 제의 유도 전동기에 부하는 인가될 때의 슬립현상 을 나타내는 것으로, 본 유한 요소해석에서는 정격 시 슬립에서만 해석하였다. 토크는 가상변위법으로 계산되며, 일정속도와 토크를 구해낼 수 있으므로 slip=0.005 에서의 출력을 얻어낼 수 있다. 계산시 간은 0~0.12[sec]로 제한하였으며, 계산시 시간간 격은 10[msec] 로 하였다. 이것은 속도가 29,850 [rpm] 일 때 회전자가 1.8° 움직일 때마다 계산하는 것으로 제한시간까지 12000 번의 계산이 이루어진 다. 그림 4는 유한 요소 해석을 위한 요소분할을 한 것이며, 총 요소수는 8652 개다.

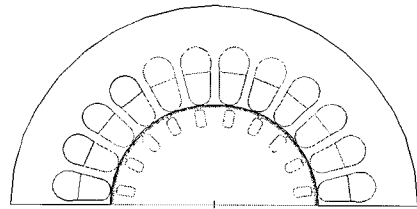


Fig. 3 Induction motor modeling for FEA

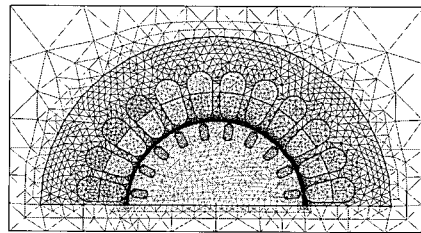
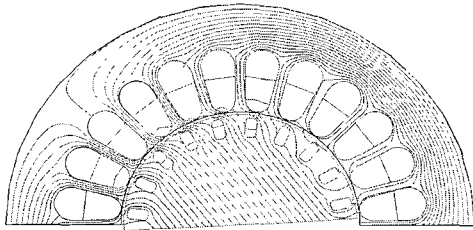


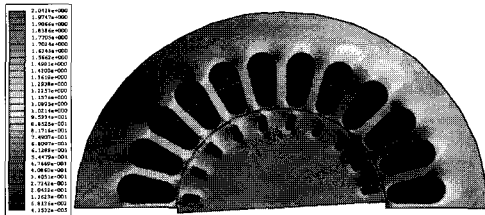
Fig. 4 2D mesh for a half analysis model

그림 5는 회전자의 위치 변화에 따른 자속선도 와 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 그림(a) 로부 터 전형적인 2극의 자속분포를 확인할 수 있으며, 슬립에 의해 공극을 지난 자속이 회전자로 들어가 면서 일그러지는 현상을 볼 수 있다. 그리고 그림 (b)로부터 고정자의 치에서의 최대 자속밀도가 약

1.2~1.5[T] 되는 것을 확인할 수 있다.



(a) Flux plot



(b) Flux density distribution

Fig. 5 Magnetic field characteristics (slip=0.005)

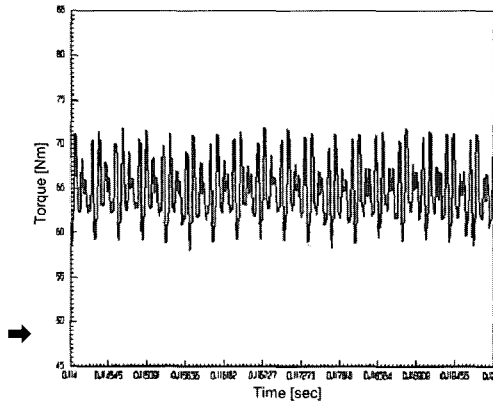
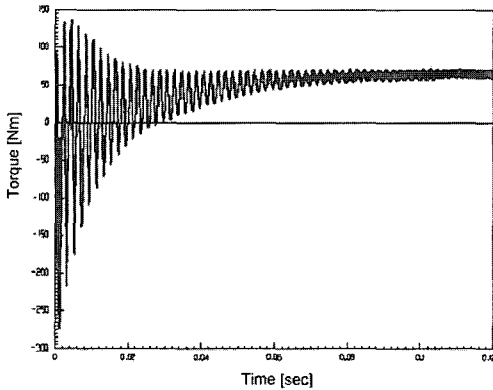


Fig. 6 Torque characteristic curves (slip=0.005)

그림 6과 그림 7은 유도 전동기 입력 전압파형이 정현적이라고 가정하였을 경우, 출력 토크와 전류의 변화를 보여주고 있다. 약 0~0.08[sec]에서는 전원인가로 인한 과도현상이 발생하여 토크와 전류가 진동하지만 이후에는 토크는 65[Nm]로, 선전류는 353 [Arms]로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 속도가 29,850[rpm] 이고 토크가 65[Nm] 일 때의 출력은 약 203[kW]이 되어 정격시의 설계값과 근사한 결과를 얻을 수 있다.

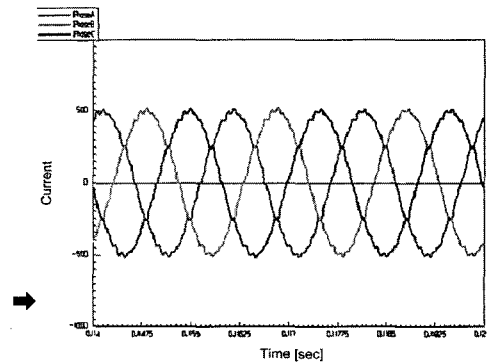
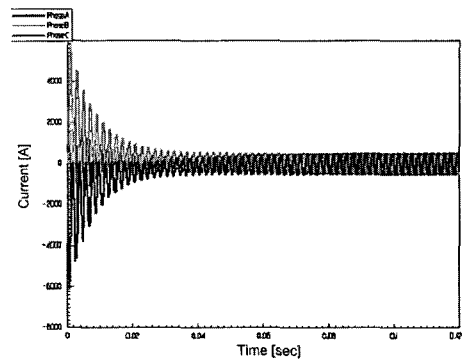
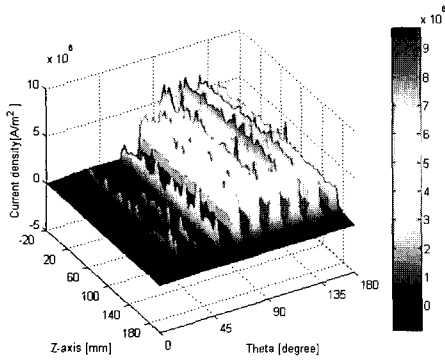


Fig. 7 Current characteristic curves (slip=0.005)

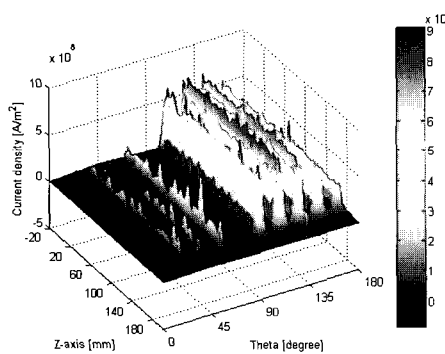
2.4.2 3차원 유한요소해석

고속 회전운동을 하는 가변속 전동기의 회전자와 고정자에서 발생하는 진동과 소음을 최소화하기 위해서는 3차원 유한요소법을 이용한 해석기술이 필요하다. 3차원 해석 기술 확보를 위해서 유도전동기의 회전자 바들 중에서 하나가 끊어진 것으로 가정하고 3차원 해석을 수행하였다. 그림 8은 원 모델과 회전자 바가 끊어진 모델에 대한 전류 밀도 그래프를 나타내며 그림에서 θ 는 전기각이다. 그림으로부터 원 모델의 전류 밀도 곡선은 정현적이지만 회전

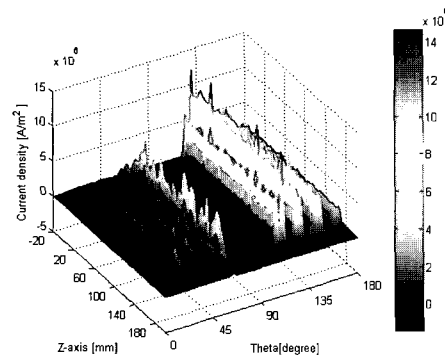
자 바가 끊어진 모델은 정현적이 아님을 알 수 있다. 또한 회전자 바가 끊어진 모델에 있어서 자속의 증가로 인하여 끊어진 회전자 바 양 끝에서 전류 밀도가 증가함을 알 수 있다. 이들 결과로부터 끊어진 회전자 바의 수가 증가하면 할수록 공극 자속 밀도의 왜곡과 함께 토크 리플의 증가를 예상 할 수 있다.



(a) Unbroken model



(b) 1 Rotor bar broken model



(c) 2 Rotor bars broken model

Fig. 9 Current density curves

3. 결 론

본 논문에서는 200[kW] 3000[rpm] gearless 구동용 유도전동기 설계 및 특성 해석에 관해서 설명하였다. 강하 분배법을 이용하여 유도전동기를 설계한 후 등가회로법을 이용하여 특성해석을 실시하고, 실 부하법 특성 실험이 불가능하여 원선도법을 이용하여 특성값을 구하여 등가회로법을 이용한 특성 해석 결과값과 비교하였다. 그리고 설계의 타당성을 보다 정확히 확인하기 위하여 2차원 유한요소법을 이용한 특성 해석을 하고 결과값을 설계값과 비교 검토하였다. 고속 회전운동을 하는 가변속 전동기의 회전자와 고정자에서 발생하는 공극 자속의 파형은 진동과 소음을 정확하게 해석할 수 있는 3차원 유한 요소해석 기법을 확립하기 위해서 설계된 유도전동기의 회전자 바의 단락사고에 대한 특성 해석을 시행하고 결과를 검토하였다. 전동기의 경우에는 고속에서 사용되기 때문에 파손시에 대단히 위험하므로 향후 제작 완성된 시작품을 제품화하고 신뢰성 있는 제품이 되기 위해서는 인버터와 결합된 신뢰성 특성시험이 지속적으로 이루어져야만 향후 상품화가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-272-0-00)주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

- [1] 磯部直吉, "新版 電氣機器設計學", オーム社, 東京, 1966
- [2] 山下善太郎, "交流機器の理論と設計", 新思潮社, 東京, 1966
- [3] C. G. Veinott, "Performance Calculation on Induction Motors", Trans. AIEE. Vol. 51, pp. 734-755, 1932.
- [4] A. F. Puchstein, "Calculation of Slot Constant", Trans. AIEE, Vol. 66, pp. 1315-1323, 1947.
- [5] P. L. Alger, "Stray Load Losses in Polyphase

Induction Machines", Trans. AIEE part, Vol. 78, pp. 349-357, 1959.

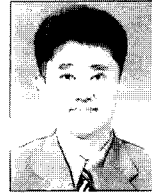
- [6] K. K. Schwarz, "Survey of Basic Stray Losses in Squirrel-cage Induction Motors", Proc. IEE, Vol. 111, No. 9, pp. 1565-1574, 1964.
- [7] R. B. Robinson, "Harmonics in A.C. Rotating Machines", Proc. IEE, Vol. 109, pt. C, pp. 380-387, 1962.
- [8] R. L. Norton, "Machine Design", Prentice Hall, 2000.
- [9] K. Matsuse, "Effect of Crosspath Resistance Between Adjacent Rotor Bars on Performance of Inverter-Fed High-Speed Induction Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, pp. 621-627, May/June, 1994.
- [10] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, "Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, No. 2, pp. 241-247.
- [11] E. Michkin, "Disturbances in the Induction Machine 연 새 Broken Squirrel Cage Rings" Journal Franklin Institute, 259, pp. 133-143, 1955.

저 자 소 개



조원영 (曹元榮)

1980년생. 2005년 2월 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2005년~현재 동아대 일반대학원 전기공학과 석사과정 재학 중.



우경일 (禹景一)

1969년생. 1995년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동대학원 졸업(박사). 2001년~현재 부경대학교 전기제어계측공학부 조교수.



조윤현 (曹允鉉)

1960년생. 1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986~1987년 삼성종합기술원 전자기기연구소 연구원. 1991년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년~1995년 한국전기연구원 선임 연구원. 1995년~현재 동아대 공대 전

기공학과 부교수