

터보기기용 300HP, 60,000rpm급 영구자석 동기전동기의 설계 및 특성해석

정연호*, 최상호**, 신진화**
*한국전기연구원, **경주전장(주)

Design and analysis of 300HP, 60,000rpm Permanent Magnet Synchronous Motor for Turbo Machine

Y.H. Jeong*, S.H. Choi**, J.H. Shin**
*KERI, **KAES

Abstract - This paper deals with the electrical design and analysis of a 300HP, 60,000rpm permanent magnet synchronous motor for turbo machine. The design is performed by analytic method of magnetic field theory. And electrical losses of the motor driven by current with sinusoidal and harmonic form are analyzed by using FEM.

1. 서 론

최근 터보 공기압축기, 터보 송풍기, 진공펌프, 원심 분리기 등의 산업용 터보기기와 플라이휠 에너지 저장장치, 마이크로 터빈용 발전시스템 등 에너지 분야에 고속 영구자석 회전기가 응용되어 상업화가 이루어지고 있다. 고속 회전기는 고속회전을 이용하여 기존의 저속 회전기보다 소형, 경량, 고출력, 고효율 성능을 얻을 수 있기 때문에 개발 시스템의 간소화, 고효율화를 위해 고속 회전기를 응용한 산업용 기기의 개발이 확대될 전망이다. 고속 영구자석 회전기는 그림 1과 같이 고속 회전으로 인한 큰 원심력으로부터 회전자를 보호하기 위하여 회전자에 비자성체 금속 캔이 필수적으로 사용되며 회전자 축으로 고강도 비자성체를 사용하는 등 기존의 저속 구동 영구자석 회전기와는 다른 형태의 특별한 모델로서 이로 인해 자기적 유효 공극이 더욱 커지게 된다.

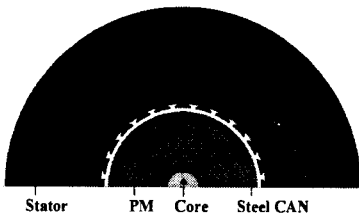


그림 1. 고속 영구자석 회전기의 형태

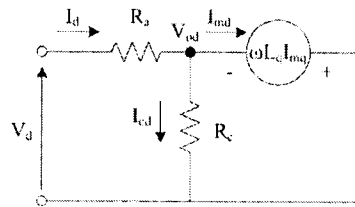
본 논문에서는 철손과 CAN손실이 고려된 등가회로방정식을 이용하여 터보기기용 300마력, 60,000rpm급 초고속 영구자석 전동기를 해석적인 방법으로 기본설계하고, 유한요소 파도해석을 통해 비자성체 CAN에 유기되는 와전류 손실, 철손 등의 손실특성을 계산한다.

2. 초고속 회전기의 설계

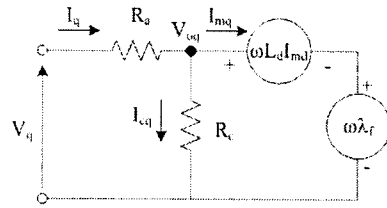
2.1 특성방정식

그림 2에는 철손과 CAN손실이 고려된 DQ-축 등가회로를 나타낸다. R_s 는 상저항을 표시하며 R_c 는 철손과 CAN의 와전류손실을 등가적으로 나타내는 저항으로서 [1] 철손과 CAN손실은 병렬로 연결된 상태이다.

그림 2로부터 영구자석 전동기의 전압 방정식은 정상 상태에서 식(1)과 식(2)로 표현된다[2].



(a) d-축 등가회로



(b) q-축 등가회로

그림 2. 영구자석 회전기의 DQ-축 등가회로

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_s}{R_c}\right) \begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_{qs} \\ \omega L_{ds} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{md} \\ I_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$R_c = \frac{R_{CAN} R_{core}}{R_{CAN} + R_{core}} \quad (3)$$

$$I_{md} = I_d - I_{cd} \quad (4)$$

$$I_{mq} = I_q - I_{cq} \quad (5)$$

$$I_{cd} = -\frac{\omega L_q I_{mq}}{R_c} \quad (6)$$

$$I_{cq} = \frac{\omega (\lambda_f + L_d I_{md})}{R_c} \quad (7)$$

I_d, I_q : 상전류의 d-와 q-축 성분

I_{cd}, I_{cq} : (철손+CAN손)의 d-와 q-축 성분

V_d, V_q : 상전압의 d-와 q-축 성분

λ_f : 영구자석에 의한 상당 쇠교자속수, rms

L_d, L_q : 인덕턴스의 d-와 q-축 성분

전류 I_a , 상 전압 V_a , 그리고 토크 T_q 는 각각 식 (8)~식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (8)$$

$$V_a = \sqrt{(R_a I_d - \omega L_q I_m q)^2 + (R_a I_q + \omega(\lambda_f + L_d I_m d))^2} \quad (9)$$

$$T_q = p \lambda_f I_m q + p(L_d - L_q) I_m d I_m q \quad (10)$$

이상으로부터 영구자석 전동기의 전기적인 파라미터인 저항, 인덕턴스, 쇠교자속수, 손실저항이 주어지면, 식 (1)~식(10)을 이용하여 영구자석 전동기의 출력특성을 계산할 수 있다.

2.2 파라미터 및 설계사양

일반적으로 영구자석 회전기의 설계는 고정자 및 회전자 기하학적인 치수, 권선사양, 영구자석 및 재료 사양 등의 변수를 여러 가지로 변화시켜가면서 기기의 파라미터와 특성계산에 의한 성능을 반복적으로 수행하여 설계 파라미터를 결정하고 우수한 성능조건을 갖도록 하는 설계 파라미터 및 운전 제어를 위한 조건을 찾아가는 확인검증 작업이 필요하다. 즉 초기설계 단계에서는 해석적인 방법을 이용하고, 자기포화 등의 보다 정확한 성능평가를 위해 유한요소법 등의 수치해석적인 방법을 이용하여 설계를 검증하여 최적조건에의 설계 파라미터를 결정하게 된다[3-4]. 그런데, 영구자석 회전기의 자기회로 해석방법으로는 집중정수로 해석하는 등가 자기회로법[5]과 전자장 이론에 의해 분포정수로 취급하는 방법[6]이 있다. 등가 자기회로법은 비선형이나 누설 및 포화현상을 고려할 수는 없으나 회로적으로 비교적 간단하게 자속을 계산할 수 있어 장하분배법과 결합하여 전동기 설계에 주로 사용되고 있다. 그러나 전동기의 치, 슬롯과 같은 기하학적 형상을 정밀하게 고려하기가 곤란하기 때문에 유기기전력의 분포와 토크 맥동 및 코깅 토크 등의 특성을 해석하기 어려우며, 유효공극이 큰 영구자석 기기에 대해서는 오차가 크게 된다.

본 논문에서는 고속 영구자석 전동기의 치-슬롯-캔-영구자석-회전자 축 등 물리적인 각 부분의 형상, 재질 등 고속회전기 특유의 제한 물리적인 조건을 정밀하게 고려하여 공극, 영구자석 등 각 부분에서 자계분포를 계산하고, 유기기전력, 인덕턴스, 토크 등 전자기적인 파라미터를 계산할 수 있는 특성방정식[7]을 이용하여 300HP, 60,000rpm급 영구자석 동기 전동기를 설계하였다. 설계조건으로서 전동기에 입력되는 선간전압은 320[V] 내외에서 결정되도록 하며, 회전자의 단면치수는 고속 회전으로 인한 원심력에 강인하도록 구조해석을 통해 회전자의 외경과 CAN 두께 등이 제시되었다. 설계를 위한 전동기의 특성곡선은 그림 3과 같다.

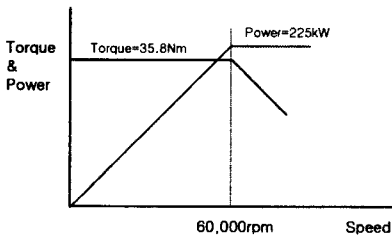


그림 3. 부하곡선

기본설계는 전자장이론에 의한 해석적인 방법으로 기기의 쇠교자속, 인덕턴스 등 파라미터와 저항을 계산하고 2.1절에 표시한 특성방정식을 이용하여 특성을 계산하여 조건에 부합되는 사양을 얻는다. 이러한 과정을 통해 설계된 사양을 표1에 나타내었으며, 전동기의 단면을

그림 4에 나타내었다.

표 1. 설계 사양

항목	사양
정격 속도[rpm]	60000
정격 전류[A]	432.0
정격 토크[Nm]	35.81
극 수	2
공극 [mm]	1.5
회전자 외경 [mm]	75
Can 두께 [mm]	5.0
고정자 외경 [mm]	178
축방향 길이 [mm]	206
영구자석 잔류자속밀도 [T]	1.09
저항 [mΩ]	1.723
동기 인덕턴스 [uH]	14.877
상당 쇠교자속 [V/rad/s]	0.040458

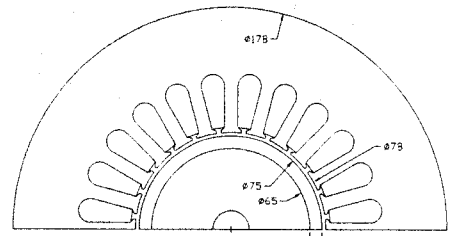
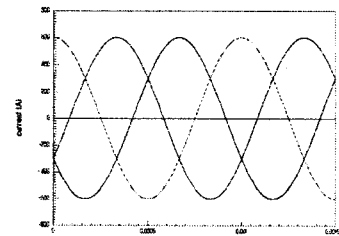


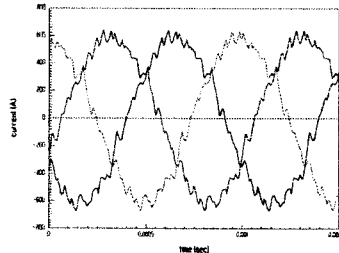
그림 4. 300HP, 60,000rpm급 전동기의 단면도

3. 유한요소법에 의한 특성해석

설계된 전동기의 상세한 특성해석은 유한요소법에 의한 과도해석을 통해 수행하였다. 고조파에 의한 손실특성을 분석하고자 그림 5에 나타난 정현파 전류와 THD 9%의 전류에 대한 손실특성을 비교하여 표2에 나타내었다.



(a) 정현파



(b) THD 9%인 전류파형

그림 5. 부하해석을 위한 전류파형

유한요소해석에서 철손은 식(11)을 이용하여 계산하였다.

$$P_c = k_h B^2 f + k_c (B \cdot f)^2 + k_e (B \cdot f)^{1.5} \quad (11)$$

표 2. 손실해석 결과

전류과형	전기적인 손실 [W]			기계손 [W]	효율 [%]
	동손	CAN손	철손		
정현파	962.7	1,794.0	1,809.4	4,300	96.21
고조파	965.0	1,991.5	1,857.6		96.11

해석결과에 따르면 THD 9%의 고조파를 포함하는 전류에서 약간의 효율저하가 있으나, 큰 차이를 보이지는 않는다. 이는 높은 차수의 고조파가 부분적으로 영향을 주기때문인 것으로 사려된다.

그림 6과 그림 7은 각각 300HP, 60,000rpm의 정격상태에서 자속밀도분포와 CAN에 유기되는 와전류손실분포를 나타낸다.

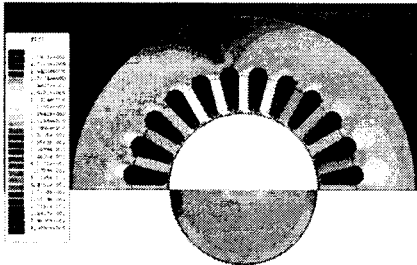


그림 6. 정격상태에서 자속밀도 분포



그림 7. 정격상태에서 CAN에 유기되는 와전류손실

그림 8과 그림 9는 속도에 따른 단자전압 및 전류, 효율 및 손실변화를 각각 나타낸다. 철손과 CAN손실을 나타내는 손실저항 R_c 는 유한요소해석에 의해 계산된 손실을 저항으로 환산한 값으로 정격상태에서 28.25[Ω]으로 계산되었다.

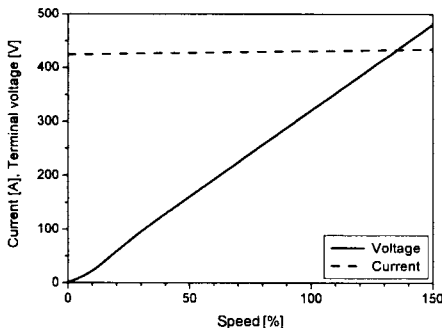


그림 8. 속도에 따른 전압, 전류변화

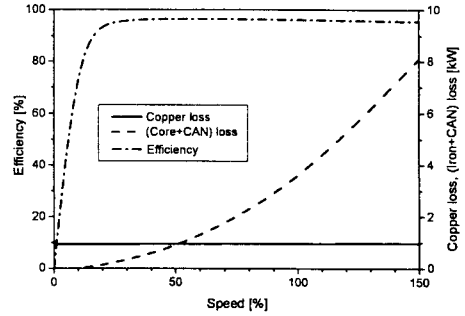


그림 9. 속도에 따른 효율, 손실변화

그림 9에 따르면 효율은 넓은 속도범위에서 약 96.2%로 일정한 값을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 터보기기용 00HP, 60,000rpm급 영구자석 전동기를 설계하고, 유한요소법에 의한 과도해석을 수행하여 부하특성을 계산하였다. 본 논문에서의 설계결과는 최종 사양을 결정하기 위한 중간단계이다. 회전자의 진동, 구조해석과 전동기의 열해석을 통해 최종적으로 고속회전에 안전한 사양이 차후에 결정된다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.S.Colby and D.W.Novotny, "Efficient operation of surface mounted PM synchronous motors", IEEE Trans. Ind. Appl. vol.1A-23, pp.1048-1054, Nov./Dec.1987
- [2] S.Morimoto, Y.Tong, Y.Takeda and T.Hirasa, "Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Electronics, vol.41(5), pp.511-517, Oct. 1994
- [3] A. Koski and J.T. Eriksson, "Predicting the performance of a permanent magnet synchronous motor by analytical and numerical method", IEEE Trans. Magnetics, vol.28(1), 1992
- [4] Yifan Tang, "Characterization, numerical analysis, and design of switched reluctance motors", IEEE Trans. Ind. Applcat., vol.33(6), 1997
- [5] T. Sebastian and M.A. Rahman, "Modeling of permanent magnet synchronous motor", IEEE Trans. Magnetics, vol. MAG-22, pp.1069-1071, Sept. 1986
- [6] Z.Q. Zhu, D. Howe, E. Bolte, and B. Ackerman, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet dc Motors, Part I: Open-Circuit Field", IEEE Trans. on Magnetics, vol.29(1), pp.124-135, Jan. 1993
- [7] 정연호, "65kW급 고속 영구자석 동기발전기의 설계 및 특성해석", 학위논문, 2007