

고속 영구자석형 동기전동기 설계 II : 손실, 동특성, 벡터제어시스템의 구현

장석영*, 조한욱*, 유대준*, 박지훈*, 성소영**
 충남대학교 전기공학과*, 한국기계연구원**

Design of High-Speed PM Synchronous Motor II : Power Losses, Dynamic Characteristics and Implementation of Vector Control System

Seok-Myeong Jang*, Han-Wook Cho*, Dae-Joon You*, Ji-Hoon Park*, So-Young Sung**
 Dept. of Electrical Engineering., Chungnam National University*, KIMM**

Abstract - This paper discusses the methods for power loss calculation of designed high-speed PM synchronous motor in previous study: Part I. Moreover, the inverter, control strategy and test system set-up are also clarified. The detailed analysis and experimental results are presented.

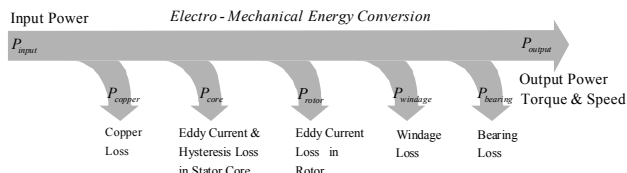
1. 서 론

최근 산업시스템이 다양해지고 에너지 절감요구가 높아짐에 따라 각종 전력변환 기기들의 고효율, 고성능화는 필수적인 조건이 되고 있다. 따라서, 전력변환기의 손실과 이에 의한 열의 발생은 효율저하 뿐만 아니라 설계 자유도 저해 요소로 작용하므로, 저손실 소재 및 손실 저감 방안에 대한 연구가 더욱 요구되고 있는 실정이다 [1]. 본 논문에서는 Part I에서 제시된 설계 파라미터를 고려하여 동손, 철손, 회전자손 등을 포함하는 손실계산 및 효율을 예측한다. 또한, 기계적 커플링 없이 저분해능 센서를 갖는 벡터제어 시스템의 구현 및 동특성 시뮬레이션, 실험결과를 통해 설계의 타당성을 검증하였다.

2. 손실 해석

2.1 고속 영구자석형 동기전동기에서의 손실

일반적으로 전기기기의 열원은 전기적 손실에 의한 것으로 동손과 철손으로 크게 나눌 수 있다. 동손은 전류의 저항손에 해당되며, 철손은 재료 자체의 자기력 특성으로 인한 히스테리시스 손과 유도전류로 인한 손실인 와전류손으로 나눌 수가 있다. 또한, 공극 자속밀도의 비정현적 분포에 의한 회전자 손실, 그리고 기계적 손실로 존재하는 베어링 마찰손과 풍손으로 분류할 수 있다. 전기기기에 있어 손실은 기기의 운전 조건이나 효율 등을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 손실을 정밀하게 예측하여 설계하는 것이 매우 중요하다.



<그림 1> 영구자석형 동기전동기의 손실 흐름도

2.2 동손

동손은 Part I에서 구해진 상저항과 정격 상전류의 rms 값으로 식(1)과 같이 구해 질 수 있다.

$$P_{copper} = 3 \cdot R_{ph} \cdot I_{ph,rms}^2 \quad (1)$$

또 다른 동손의 원인으로 와전류 효과를 들 수 있는데, 첫째, 권선의 포피효과에 의한 손실증가, 둘째, 권선 주변 자속의 변화에 의한 와전류 손실의 발생이 그것이며, 자속변화에 의한 와전류 손실은 식(2)와 같다 [2].

$$P_{copper,eddy} = \frac{6\pi d_0^4 L_{stk} \omega_c^2 N_{ph} N_{so} B_m^2}{128 \rho_c} \quad (2)$$

그러나, 설계시 침투깊이보다 작은 권선의 설계와 이론적으로 슬롯내부에서의 자계는 거의 0에 가까우므로 식(2)에 의한 권선의 와전류 손실은 거의 0이다.

2.3 철손

철손은 교류전력 장치에서 사용되는 철심에서 발생하는 열 손실의 근원이 되는 것으로, 교류 전력 장치의 설계 뿐만 아니라 효율 면에서도 중요한 비중을 차지하고 있다.

일반적으로 철손은 히스테리시스 손, 와전류 손, 이상와전류 손에 의해 식(3)의 수정된 Steinmetz 식으로 표현 될 수 있다.

$$P_{core} = P_h + P_e + P_a \\ = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (3)$$

철손은 우선 전기장관 제작자로부터 주어지는 철손데이터로부터 데이터를 수집하고, Curve fitting 과 교번자계, 회전자계의 분리를 통하여 얻어질 수 있다.

그림 2 는 해석 및 실험에 의하여 구해진 철손을 나타낸다. 해석결과는 정격속도 28000rpm에서 FEM 해석치와 약 18%의 에러를 갖는다. 그리고, 20000rpm에서의 실험결과와 해석치와 유사함을 알 수 있다.

2.4 회전자손

고속 영구자석형 전기기기에서의 회전자 손실은 일반 중저속 기기에서의 손실양에 비해 매우 크므로 이에 대한 정확한 예측이 필요하다. 특히 고정자에서 발생하는 동손이나 철손에 비하여 회전자의 냉각이 어렵다는 점을 감안하면, 설계단계에서부터 회전자 손실의 예측 및 저감에 대한 연구가 필요하다.

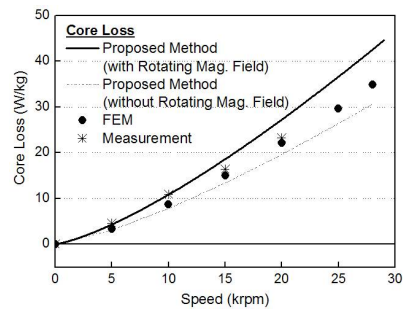
회전자 손실의 발생 원인은 고정자 슬롯형상에 의한 무부하손, 고정자 자계에 의한 부하손, 인버터 시간 고조파에 의한 손실, 3경우가 있는데 본 논문에서는 무부하손과 고정자 자계에 의한 부하손만을 다룬다. 회전자 내부에서의 손실흐름을 정의하는 포인팅 정리는 식(4)와 같다.

$$P = E \times H \quad (4)$$

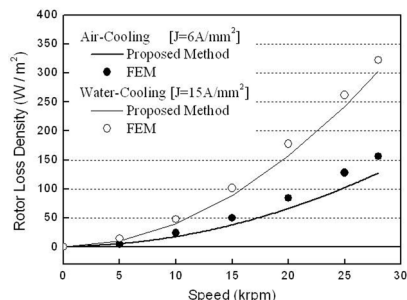
표 1은 운전조건에 따른 제질별 회전자 손실결과를 나타낸다.

2.5 풍손

풍손은 초고속으로 운전되는 전기기기에서 회전자 와전류 손실과 함께 회전자 열발생의 주원인이 되고, 속도가 높고 출력이 큰 대형기기에 상대적으로 큰 값을 갖는다. 그림 4는 전동기 내부기압이 1-기압 상태라 가정하였을 때 풍손 해석 결과를 나타낸다. 대부분의 풍손발생은 약 94.2% 정도가 원통 접촉면에서 발생하며, 디스크 접촉면에서는 약 5.78% 가 발생함을 볼 수 있다. 또한 상대적으로 간극거리가 짧은 공극



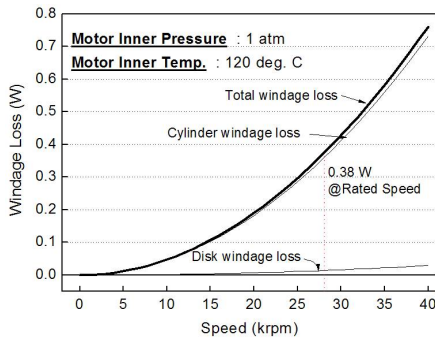
<그림 2> 철손 해석 및 실험 결과



<그림 3> 냉각 조건에 따른 부하시 회전자손실 해석 결과

<표 1> 회전자 재질에 따른 운전조건별 회전자 손실

Material	Air cooling	Water cooling
Sleeve	125.6922 (W / m ²)	290.0344 (W / m ²)
PM	2.2145 (W / m ²)	14.3857 (W / m ²)
Total	127.9066 (W / m ²)	304.4201 (W / m ²)



<그림 4> 풍손 해석 결과

에서 대부분의 손실이 발생하므로, 공극의 길이가 풍손에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 전동기가 전부하 조건에서 정격속도로 회전할 때 풍손은 약 0.38 W이다.

2.6 효율

설계된 전동기의 총손실 및 이론적 손실은 표 2와 같다. 이론적으로 효율은 약 97% 정도이며, 본 논문에서는 정현파 전류의 입력에 대한 손실만 해석에 고려되었으므로 실제 스위칭에 따른 손실분을 추가한다면 약 95% 정도가 될 것으로 예측된다.

<표 2> 전체 손실 및 효율

Loss	Analytical	FEM
Copper Loss, P_{copper}	9.50 W	8.11 W
Core Loss, P_{core}	15.80 W	12.91 W
Rotor Loss, P_{rotor}	0.69 W	0.84 W
Windage Loss, P_{wind}	0.38 W	-
Other Losses, P_{other}	5.00 W	-
Total Loss, $P_{total.loss}$	31.37 W	27.24 W
Efficiency	96.9 %	97.3 %

3. 동특성 및 제어시스템 구성

3.1 벡터제어 시스템 구성

Part I에서 설계된 1kW 28000rpm급 고속 영구자석형 동기전동기의 성능시험을 위하여 TI DSP TMS320F2812를 Main Controller로 하는 SVPWM 인버터를 구현하였다. 특히, 고속운전시 엔코더등의 고분해능 센서는 기계적 커플링이 요구되므로, 3-홀센서를 갖는 벡터제어알고리즘을 적용하였다. 그림 5는 시스템 블록다이어그램을 나타내며, 그림 6은 실제 제작된 전동기, 다이내모미터, 인버터, 계측시스템을 갖는 실험 셋을 나타낸다.

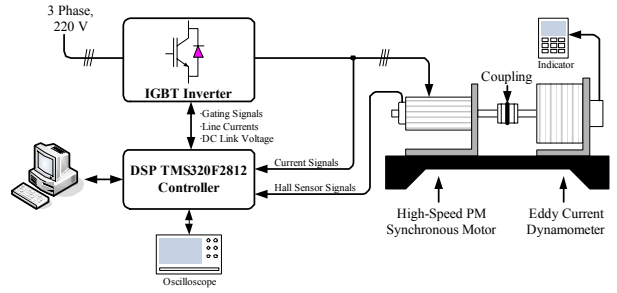
3.1 실험 및 설계검증

그림 7(a)는 전류제어기에 의한 전류응답 특성을 나타내며, 그림 7(b)는 전동기 속도지령이 3000rpm일 때 속도응답 특성을 나타낸다.

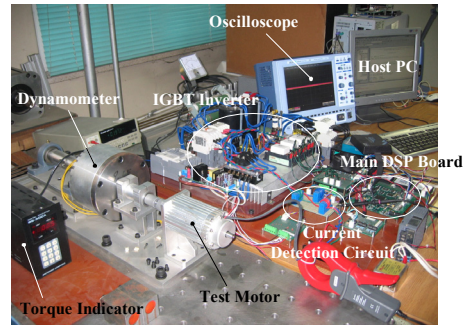
표 3은 전동기 q축 전류지령이 1A 로 일정할 때 0-5000rpm의 속도변화에 따른 해석 및 실험결과를 나타낸다. 표 4는 속도가 3000rpm으로 일정할 때 q축 전류에 따른 해석 및 실험결과를 나타낸다. Part I의 정특성에 의한 해석결과와 FEM, 실험결과를 통해 설계된 전동기의 벡터제어 성능이 우수함을 예측할 수 있으며, 설계의 타당성을 검증할 수 있었다.

4. 결 론

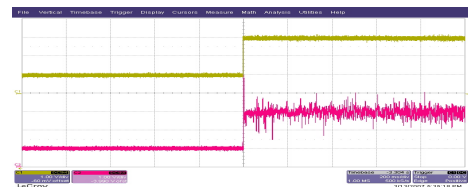
본 논문에서는 고속 영구자석형 동기전동기에서 반드시 고려되어야 할 손실특성, 벡터제어에 의한 동특성에 대한 사항을 다루었으며, 이를 통해 전동기의 효율 및 제어성능에 대한 검증이 이루어졌다. 실제적인 문제에서 전동기의 냉각조건을 설정하기 위한 열적 특성에 관한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단되며, 센서리스 제어, 약계자 제어 등의 알고리즘을 통한 더욱 신뢰성있는 운전기법에 대한 지속적인 연구가 요구된다.



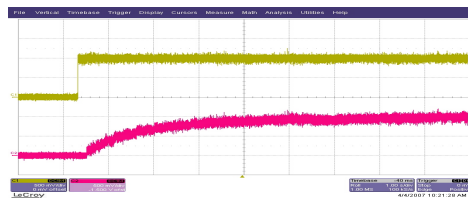
<그림 5> 고속 영구자석형 동기전동기 제어시스템 블록 다이어그램



<그림 6> 고속 영구자석형 동기전동기의 벡터제어 시스템



(a) 전류 응답 ($i_q=1A$, 1 A/div.)



(b) 속도 응답 ($w_r=3000$ rpm, 1500 rpm/div.)

<그림 7> 벡터제어에 의한 전류 및 속도응답

<표 3> Variable speed test

ω_r (rpm)	i_q (A)	T_{out} (Nm)		
		Analytical	FEM	Measured
1000	1	0.081	0.077	0.068
2000	1	0.081	0.077	0.074
3000	1	0.081	0.077	0.072
4000	1	0.081	0.077	0.068
5000	1	0.081	0.077	0.070

<표 4> Variable load test

ω_r (rpm)	i_q (A)	T_{out} (Nm)		
		Analytical	FEM	Measured
3000	1	0.081	0.077	0.068
3000	2	0.164	0.154	0.148
3000	3	0.246	0.231	0.225
3000	4	0.328	0.308	0.281

[참 고 문 헌]

[1] David P.Arnold, Sauparna Das, Jin-Woo Park,I. Zana, Jeffery H. Lang, "Microfabricated high-speed axial-flux multiwatt permanent manget generators-part II:Design, fabrication, and testing," J Micromech. Syst., vol.15, pp.1351-1363, Oct. 2006.
 [2] Kamakshi Sridhar, "Electromagnetic models for slotless PM synchronous motor drives," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol.1, pp.367-377, Dallas, US, March, 1995