2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2011. 7. 20 - 22

냉동탑차용 매입형 영구자석 동기발전기의 해석 및 응용

장진학, 조창흠, 이상건, 최다운, 조윤현
동아대학교 전기공학과

A design and development on Refrigerated Vehicle of IPMSG

Jin-Hak Jang, Chagn-Hum Jo, Lee Sang-Gone, Da-Woon Choi, Yun-Hyun Cho
Electrical Engineering Department, Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 특수차량용 발전기 시스템에 적용되는 3.5kW급 매입형 영구자석 동기발전기의 설계 및 특성해석에 대해 나타내었다. 본 연구에서는 DC전원의 전압을 280[V], 발전기 측에서 발생하는 선간전압을 293.2[V]로 설정하여 설계하였다. 정격속도 2,000[rpm]에서 정상 구동하는 발전기를 목표로2차원 유한요소해석을 통하여 속도별 역기전력과 정격에서의 전압, 전류, 출력에 대해 실험값과 비교 검증하였고, 약계자 제어를 통해 각 속도 영역에서 일정전압이 유기됨을 실험을 통해 검증하였다.

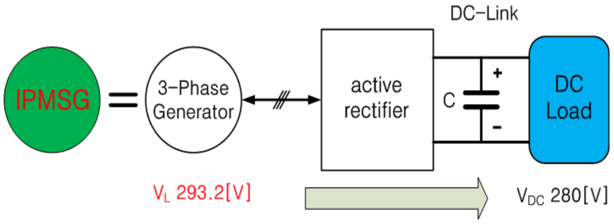
1. 서 론

매입형 영구자석 동기발전기(Interior Permanent Magnet Synchronous Generator : 이하 IPMSG)는 회전자 철심 내에 영구자석을 삽입하는 구조로 다양한 형태의 형상 구현이 가능하다. IPMSG는 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 마그네틱 토크 외에 릴럭턴스 토크도 이용 가능하다. 그리고, 영구자석이 회전자 내부에 고정 되어 있어 고정자 권선에서 발생하는 열의 영향을 직접적으로 받지 않고, 브릿지의 강도만 해결한다면, 비자성체 보호관 없이 자석 비산을 방지할 수 있으며, 등가적으로 공극 공극이 작아 영구자석의 동작점 자속밀도를 향상 시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점을 활용하기 위해서는 기계적 강성에 밀접한 브리지 설계와 토크리플, 코깅토크 등 추가적인 설계가 세심하게 이루어져야한다. 그리고 정현적인 역기전력 파형을 얻기가 어렵기 때문에, 토크리플의 영향을 주는 3, 5고조파 등을 제거하는 설계가 필요하다. 본 논문에서는 설계된 3.5kW급 IPMSG을 2차원 유한요소법을 이용하며 구한 특성결과를 데이터값과 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1 기본 설계

본 논문은 3.5kW 3상 매입형 영구자석 동기발전기를 설계 및 분석하였다. IPMSG의 구성으로는 그림 1과 같이 크게 발전기와 전력변환, 부하장치로 구성될 수 있다.



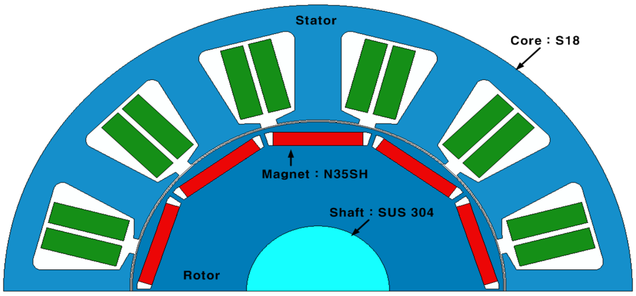
<그림 1> 3.5kW급 영구자석형 동기발전기의 전체구성도

본 설계에서는 DC전원의 전압을 280 [V_{dc}]으로 발전기 측에서 발생하는 선간 전압을 293.2[V]로 설정하여 설계하였다. 설계된 IPMSG의 발전 모드동작은 280[V_{dc}]로 얻어진 출력단 전압으로부터 시작되며, 실제 발전 기로 얻어지는 전압은 손실과 인입선 등의 손실을 고려하여서 이보다 더 높은 영역을 설계하여야 한다. 발전 전압은 AC을 DC로 변환 해주는 정류기를 지나서 충전용 2차전지에 필요한 전압으로 전압을 변환 시켜주 는 Buck Converter를 거쳐 충전이 가능하게 된다. 또한 IPMSG의 정격 속도는 2,000[rpm], 최대속도는 6,000[rpm]으로 설정하였다. IPMSG 타입을 선정 이유는 d축, q축 인덕턴스 차이에 의해 발생되는 릴럭턴스토크를 적절히 이용함으로써 고효율, 고출력, 고토크, 고속운전 등 장점으로 인하여 선택하였다. 표 1은 시작품의 주요 제원을 나타내고 있다.

<표 1> IPMSG 설계 제원

Items	Specification
출력 전압	DC 280 V
발전기 타입	IPM, 10극 12슬롯
운전 주파수	166.7 - 500 Hz
전류 제한치	20 A_{rms}이하
속도 영역 범위	정격 : 2,000 rpm, Max : 6,000 rpm
출력	발전 : 3.5kW
냉각 방식	강제냉각모드
운전시간	Continuous
권선형태	집중권
제한 전류밀도	7 $[A/mm^2]$

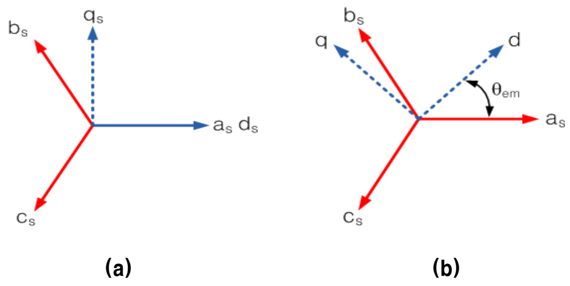
그림 2는 IPMSG의 2차원 모델링으로서 1/2 형상만 나타내었다. 여기서 고정자 부분은 12개의 슬롯으로 구성되어 있고, 코일은 2개의 병렬구조로 설계하였으며, 각 상당 62턴으로 구성하였다. 또한 병렬구조의 구성으로 인해 각 슬롯당 도체수는 124턴이 되고, 도체의 점적율은 약 68.9%로 설계하여 권선작업에 어려움이 있어 분할코어로 제작하는 방안을 고려하였다. 영구자석은 선형적인 감자특성을 가지며, 높은 보자력과 잔류자속밀도를 갖는 NdFeB를 사용하였다.



<그림 2> IPMSG의 2차원 모델링의 1/2 형상

2.2 IPMSG의 유한요소해석

IPMSG의 자속밀도가 높은 부분을 자세히 분석하기 위해 d, q축 인덕턴스를 산출한다. 그림 3에 나타낸 정상시의 자속벡터도 이용하여 구할 수 있다.



<그림 3> 고정자와 회전자 사이의 d-q축 관계도

모터단자 개방하고, 부하 측으로부터 모터를 구동한 상태를 가정을 하

여 유한요소법으로 회전자를 회전시켜, U상 권선에 쇄교하는 자속 또는 U상의 유기전압의 변화를 계산한다. 모터에 전류를 흘린 상태라고 가정하고, 인덕턴스를 계산하고 싶은 전류값을 I_a, 임의의 전류 위상 β로 입력한 후 앞에 방법과 같이 쇄교자속 또는 U상의 유기전압 변화를 계산하다. 그 후 얻어진 파형의 기본파성분의 실효값 Ψ_{ua}, Ψ_{uo} 및 위상차 α를 계산하여 식 (1)과 같이 도출한다.

$$\Psi_u = \frac{V_u}{2\pi f} \tag{1}$$

위에서 얻어진 값으로부터 식(2)을 이용하여 산출한다.

$$i_d = -I_a \sin\beta\ ,\quad i_q = I_a \cos\beta \tag{2}$$

$$\Psi_a = \sqrt{3}\Psi_{ua}\quad ,\quad \Psi_o = \sqrt{3}\Psi_{uo}$$

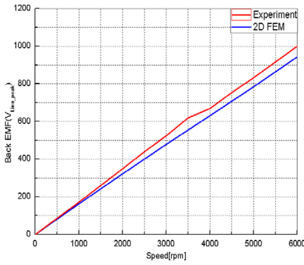
$$L_d = \frac{\Psi_o \cos\alpha - \Psi_a}{i_d}\quad ,\quad L_q = \frac{\Psi_o \sin\alpha}{i_q} \tag{3}$$

여기서, Ψ_u는 쇄교자속 실효값[Wb], V_u는 유기전압 실효값[V], f는 회전주파수[Hz]를 의미한다.

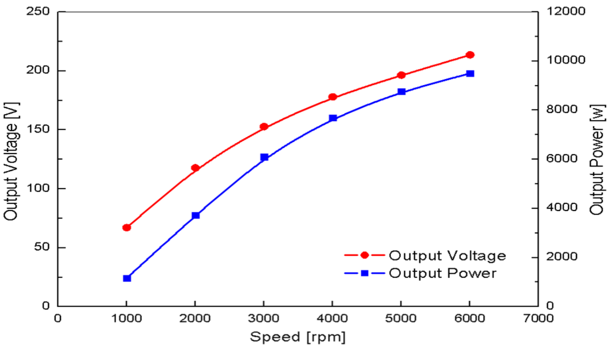
2.2 특성 결과

그림 4는 어떠한 부하를 연결하지 않은 상태에서의 역기전력 특성을 알아 보았으며 각 속도별로 나타나는 역기전력의 값을 시뮬레이션과 실험상의 결과를 표와 그래프로 나타내었다. 시뮬레이션상의 결과와 실험결과의 오차범위는 ±5%내로 나타난다.

Speed	Back_EMF		비고
	2D FEM	Experiment	
0	0	0	
1000	162.8	171.888	
2000	322.2	348.604	Rated speed
3000	478.5	524.557	
4000	630.9	668.926	
5000	784.45	832.58	
6000	943.3	999.86	Max Speed

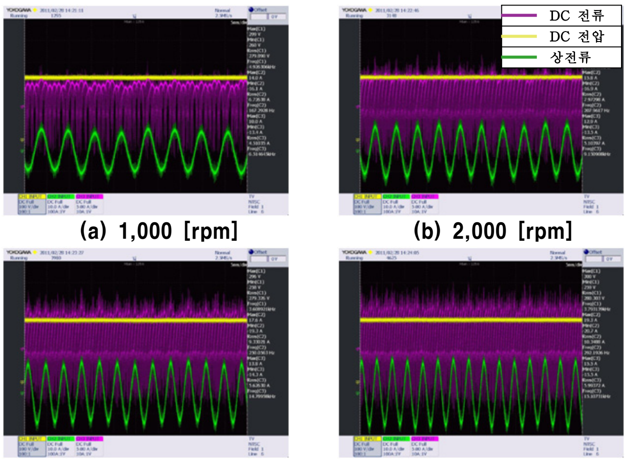


<그림 4> 각 속도별 역기전력 시뮬레이션과 실험상의 결과 비교



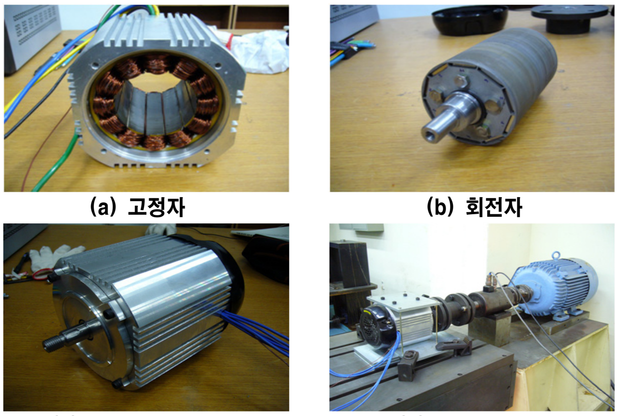
<그림 5> 정격부하저항에서 속도가변 해석

그림 5에 나타낸 것처럼 정격 rpm에서 원하는 출력값이 나오는 것을 알 수 있다. 그림 6은 약계자 제어를 통해 각 속도 영역에서 280[V_{dc}]의 일정 전압 이 유기됨을 알 수 있으며, 그에 따라 일정 출력이 발생한다. 약계자제어가 원활히 되기 위해서는 고속 시 저항에 의한 전압강하성 분과 유기기전력의 합이 DC링크 전압을 넘어서는 안된다. 본 연구에서 설계, 제작된 단품의 조립과 제작과정의 형상은 그림 7와 같고, 그림7(a) 는 고정자에 권선 와인딩을 한 것을 나타내며, 그림 7(b)는 로터에 자석 을 삽입한 것을 보여준다. 자석이 고정이 안 될 경우 소음, 진동의 원인 이 될 수가 있으므로 자석본딩을 유심히 고려해야 한다. 그림 7(c)는 제작되어진 시제품의 형상을 나타내며 각 상별로 2 선씩 총 6개의 리드 선을 밖으로 도출하였다. 그림 7(d)는 제작되어진 IPMSG의 특성을 고찰하기 위한 실험장치 구성을 나타낸다. 발전기의 특성을 고찰하기 위하여 무부하 시험, 부하시험 등을 하기 위한 계측 장치로 구성하였다. 표 2에서 IPMSG의 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하였다.



(a) 1,000 [rpm] (b) 2,000 [rpm]
(c) 3,000 [rpm] (d) 4,000 [rpm]

<그림 6> 약계자 제어시의 실험값



(a) 고정자 (b) 회전자
(c) 제작후의 IPMSG (d) 구동 테스트

<그림 7> 개발된 IPMSG의 형상 및 계측장치 구성

<표 2> IPMSG의 특성결과 비교

Items	2D FEM	Experiment
Phase Current[A]	11.2	12.5
Phase Voltage[V]	117.8	116.7
Torque[N.m]	19	17.5
Output Power[W]	3720.2	3665.2
Input Power[W]	3979	3936
Efficiency[%]	93.5	93.1

3. 결 론

본 논문에서는 특수차량용 발전기 시스템에 적용되는 3.5kW급 매입형 영구자석 동기발전기의 특성해석에 관한 연구로써 2차원적 유한요소 해석결과는 실험을 통하여 전압 및 전류, 효율, 속도 등이 정확한 해석을 되었음을 확인 할 수 있었다. 향후 토크리플을 주는 3, 5 고조파를 제거할 수 있는 설계를 통하여 좀 더 정확한 특성해석을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

[참 고 문 헌]

[1] 이범주, “부하상태를 고려한 매입형 영구자석 전동기의 역기전력파형 연구”, 2006 1, 811-812, 2006
[2] 전기기기산업 인력양성센터[HCEM], “IPM 전동기 설계 핵심 포인트”, 전기/설계 분야, 2010