

5상 5kW 표면부착형 영구자석 동기발전기 특성개선

(An Improved Operating Characteristics of Surface Permanent Magnetic Synchronous Generator for 5-Phase 5kW)

정형우* · 김민회 · 송현직 · 김동희**

(Hyung-Woo Jung · Min-Huei Kim · Hyun-Jik Song · Dong-Hee Kim)

Abstract

This paper propose a improved operating characteristics of the 5-phase 5kW within developed the surface permanent mount synchronous generator (SPMSG) in order to make a study of a polyphase ac motors keeping hold of more advantages. The developed manufacturing motor was necessary to do improvement of voltage regulation, efficiency, operating characteristics, and so on at the rated load. There are remake a redesigned and distributed stator winding connection without changing the frames of stator and rotor core in previous established generator by a repeat tests. There are shown a amplitude and waveform of the generated electromotive force, FFT analysis of harmonics within output voltages, and reviewing a experiment results in load of resistive and 5-phase induction motor by variable generator output frequency.

Key Words : Five-Phase, SPMSG, THD, Design Generator, Generator Characteristics

1. 서 론

최근 5상 전동기를 비롯한 다상 교류전동기가 하이브리드 전기자동차나 우주항공 및 선박 추진시스템 등과 같은 분야에서 3상 전동기를 대체할 차세대 전동기로 관심이 고조되고 있으며, 이에 대한 연구가 대단

히 활발하게 이루어지고 있으며, 11상(eleven-phase)의 농형 유도전동기에 대한 연구 결과도 보고되고 있다[1-7].

다상 전동기(polyphase motor)는 일반적인 단상 전동기에 비해서 추가적인 자유도를 가진다는 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 산업분야에서 가장 많이 사용되고 있는 기존의 3상 전동기에 대비해서, (1) 같은 출력에서 상당전압의 변화 없이 상당 전류의 크기 저감, (2) 토크의 맥동주파수를 증가시킴으로써 토크 맥동 감소, (3) 인버터의 직류 링크전류에 고조파 성분을 저장하여 회전자에 고조파 성분 감소, (4) 전동기의 정격전력 변화 없이 상당 토크 크기 감소, (5) 높은 전류 밀도 공급이 가능하여 출력 토크의 크기 증가, (6) 시

* 주저자 : 영남대학교 대학원 박사과정
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
* Main author : Yeungnam Univ. Graduate School
** Corresponding author : Yeungnam Univ., Dept. of Electrical Engineering Professor
Tel : 053-810-2488, Fax : 053-810-4767
E-mail : dohkim@yu.ac.kr
접수일자 : 2013년 4월 9일
1차심사 : 2013년 5월 21일, 2차심사 : 2013년 5월 27일
심사완료 : 2013년 7월 19일

시스템의 신뢰성을 증가시킬 수 있는 등의 다양한 장점을 가지고 있다[7-8].

일반적으로 인버터에 의해 구동되는 다상 전동기는, 공급전원의 고유특성과 호환성의 우수한 특성, 코어의 활용도 개선, 단위면적 당 출력 증가 및 제작의 편의성 측면에서, 고정자의 권선을 집중권의 형태로 제작한다. 집중권을 가지는 전동기에서는 공극자속이 정현파 형태가 아닌 사다리꼴 형태의 파형으로 나타나게 되므로, 전동기에서 발생하는 역기전력도 정현파 형태가 아닌 사다리꼴 형태의 파형이 된다. 5상 전동기는 전통적인 3상 전동기에 비해 구조적인 관점에서 2가지의 큰 차이점을 가지고 있다. 첫 번째는 분포권을 사용하지 않고 집중권을 사용하며, 두 번째는 3차 공간 고조파 성분을 포함하고 있으므로 교류기는 사다리꼴 형태의 역기전력이 나타나는 차이를 지니게 된다[10-13].

다상 전동기 제어 시스템에 관한 연구를 위해서 사용되는 전원시스템은 3상 인버터에서 스위칭 소자로 구성된 브리지 회로에 락(lag)을 추가한 다상의 인버터를 사용하고 있다. 이와 같이 스위칭 소자를 사용하는 다상 인버터의 전원시스템은 전력용 반도체 소자의 스위칭 작용에 의한 고조파 성분이 많이 포함되는 전원이므로, 연구용으로 설계 제작된 다상 교류전동기의 정확한 파라메타 측정과 운전특성을 파악하는데 있어서 오차를 가져오는 등의 정확도에 어려움이 따르게 된다. 그러므로 다상 교류전동기 제작에 대한 연구를 위해서는 고조파 성분이 적게 포함되는 품질이 우수한 다상 정현파 교류전원이 필요하게 된다[2].

이에 따라 5상 교류전동기의 기계적인 특성을 연구하기 위하여 시험용인 5상 5kW 220V, 60Hz의 표면부착형 영구자석 동기발전기(Surface Permanent Magnetic Synchronous Generator, SPMSG)를 설계 제작하여 개발한 연구결과가 발표되었으며[2], 또한 개발된 이 발전기의 운전특성을 분석한 연구결과 특성개선의 필요성이 제시되었다[3]. 본 연구에서는 이 SPMSG에서 철심의 수정 없이 고정자 권선의 재설계에 의하여 역률, 효율, THD 등의 운전특성을 개선한 결과를 고찰한다.

2. 5상 SPMSG 설계

5상 220V, 60Hz, 3.0kW 소형 교류전동기의 실험용 전원장치로 사용하기 위하여, Maxwell 2D와 Simplorer를 사용하여 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG)를 개발하였다. 설계 개발된 5상 5.0kW SPMSG의 특성은 표 1과 같다.

그림 1은 재설계된 SPMSG의 고정자와 회전자의 형상과 자속밀도 분포도에 따른 운전특성을 시뮬레이션에서 보여주는 것이다. 재설계에서는 이미 설계 제작된 고정자와 회전자의 구조와 형태를 변화하지 않고, 고정자 슬롯의 코일 점접촉을 고려하여 권선설계를 시뮬레이션과 시행오차를 실시하여 기존에 제작된 철심에서 최적의 특성이 얻어 질 수 있도록 하였다. 이전의 발전기에서 고정자 도체는 설계에 사용된 프로그램에 의하여 결정된 원형코일의 직경 0.9mm×45turn을 사용하였으나, 재설계된 발전기에서는 원형코일 0.65mm×48turn과 0.70mm×48turn을 두 가닥 병렬로, 한 상당 2개의 도체를 권선피치 5mm의 2층 분포권으로 접속하는 방식을 채택했다[2].

회전자는 자극 구조가 8극으로, 철심은 S-18을 사용하였으며, 자성재료는 Nd2Fe14B를 사용하였다. 그림 2는 슬롯 40개에 8극 2층 분포권으로 배치한 고정자 권선의 전개도이다.

3. SPMSG 시험

그림 3은 5상 5.0kW 발전기를 운전하기 위해 원동기용으로 3상 서보 동기전동기(APM-SF-50D, 5.0kW)와 AC 서보 드라이버 APD-VS750N(7.5kW)을 사용한 실험 시스템의 셋업한 장치이며, 그림 4는 계측장비와 저항 부하저항을 보여준다.

표2는 HP4263A LCR meter로 측정한 고정자 권선의 특성을 보여준다. 측정조건은 주파수와 전압을 1KHz, 1.0V와 100Hz, 500mV의 두 가지 조건에서 측정하였으며, 회전자의 위치를 변경하여 가면서 각 상당 3회 측정된 결과의 평균값이다.

60Hz에서 고정자 권선의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_1 = R_s + jX_{l1} = 4.159 + j10.224 [\Omega](75^\circ C)$$

표 1. 개발된 SPMSG의 특성
Table 1. The specifications of developed SPMSG

구분	규격	구분	규격
정격출력	5.0Kw	고정자 외경	220mm
정격전압	220V	회전자 외경	119mm
1차 전류	21.94A	공극	1.0mm
정격주파수	60Hz	적층 두께	85mm
극수	8극	고정자 슬롯 수	40개
정격회전수	900rpm	코일 그룹 수	20개
역율	88.0%	상당 고정자 코일	0.65+0.7mm×48turn
효율	91.0%	코일 배치	2층 분포권
자극 보자력	12.80e	자성재료	Nd2Fe14B
자극잔유자기	13.100G	최대 B-H적	41.7MGOe
철심 재료	S-18	고정자권선 ($Z = R_s + jX_s$)	$4.159 + j10.224$ $L_s = 27.12 [mH]$

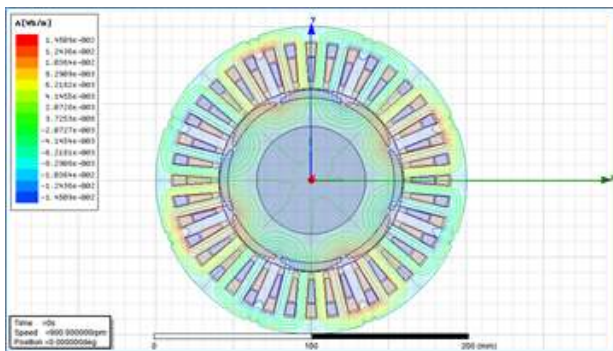


그림 1. 재설계된 발전기의 운전을 시뮬레이션 한 자기해석과 동작
Fig. 1. Analysis of electromagnetic field and operating for redesigned generator driving

표 2. 고정자 권선 저항 및 인덕턴스 측정결과
Table 2. Measured resistance and reactance of stator winding

측정 환경	R_s, Ω	L_s, mH	비고
1KHz, 1.0V	3.45	27.39	평균
100Hz, 500mV	3.47	26.85	평균
평균	3.46	27.12	주위온도: 23도

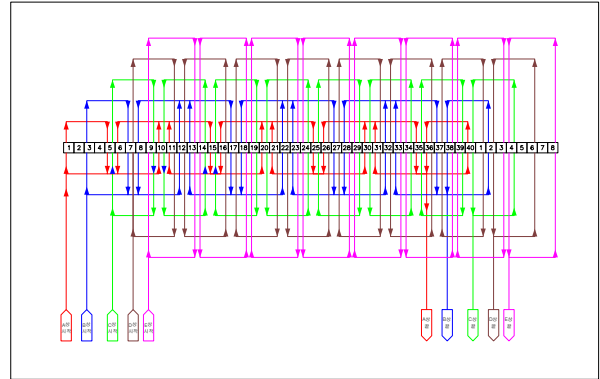


그림 2. 5상 고정자 권선 전개도(8극, 2층 분포권)
Fig. 2. Winding connection diagram of 5-phase stator (8-pole, 2 layer and distributed winding)



그림 3. 발전기 구동용 M-G 셋업 장치
Fig. 3. M-G setup apparatus for generator driving



그림 4. 5상 발전기의 부하저항
Fig. 4. Resistive load for 5-phase SPMSG

4. 개발된 발전기 운전특성

개발된 발전기의 운전특성을 조사하기 위하여 그림 5와 같은 실험 장치를 구성하였다. 개발된 5상 동기발전기(SPMSG)는 영구자석을 사용하기 때문에 자속을 가변할 수 없으므로 출력전압을 가변할 수 없다. 따라서 발전기에서 발생하는 전압을 조정하기 위해 단상 전압조정기 5대를 연결하여 출력전압을 조정한다.

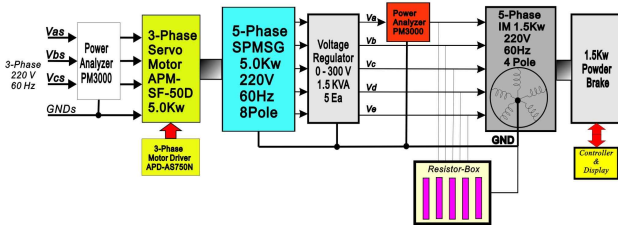


그림 5. 실험장치 블록도
Fig. 5. Block diagram of experimental apparatus

부하를 조절하기 위해서 저항과 5상 농형 유도전동기를 병용하여 사용하도록 하였다. 전동기의 부하제어는 Leroy Sommer FFT 10/13 파워터 브레이크 실험 장치를 사용하여 조정하며, 출력의 전력과 토크 및 속도를 측정한다. 발전기의 입력은 3상 서보전동기의 기계적 출력이 되므로 서보전동기의 입력을 측정하여 전동기 종합 손실을 계산하면 구할 수 있다. 따라서 발전기의 주파수 가변은 원동기인 서보전동기의 속도를 제어함으로써 변화시킬 수 있다. 이 장치를 이용하여 다음과 같이 무부하시 원동기의 회전수 가변으로 전원주파수 변화에 따라 발전기에서 발생하는 유도기전력의 특성을 측정하였으며, 저항 부하와 유도전동기 부하에서 주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력의 부하특성도 조사하였다.

4.1 무부하시 전원 주파수 가변에 따른 발생 기전력

표 3은 서보전동기의 회전수를 가변하여, 전원주파수 변화에 따라 a, b, c, d, e상에서 발생하는 유도기전

력의 상전압과 선간전압의 크기를 오실로스코프를 사용하여 실효값을 측정한 결과이다. 그림 6은 무부하시 낮은 주파수인 5Hz에서 a, b, c상에서 발생하는 유도기전력의 상전압 파형이다. 그림 7은 정격 주파수인 60Hz에서 무부하시 각 상에서 발생하는 유도기전력의 상전압 파형과 a상의 역기전력 파형을 PSIM 프로그램을 사용하여 고조파를 분석한 결과이다.

표 3. 무부하에서 주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력

Table 3. Induced electromotive force(EMF) by variable frequency on no-load

구분	5Hz	10Hz	30Hz	50Hz	60Hz	65Hz
a상 상전압	21.006	42.074	126.166	210.404	252.442	273.121
b상 상전압	21.250	42.332	127.523	212.315	254.787	276.002
c상 상전압	21.110	42.521	126.922	211.988	253.807	274.855
d상 상전압	21.219	42.399	126.875	211.585	253.745	274.660
e상 상전압	21.143	42.260	126.950	211.271	253.583	274.609
평균 상전압	21.146	42.317	126.887	211.513	253.673	274.649
ab상 선간전압	24.650	49.257	148.127	246.792	295.936	320.678
bc상 선간전압	24.815	49.602	148.907	247.835	297.603	322.448
cd상 선간전압	24.817	49.574	148.675	248.091	297.455	322.039
de상 선간전압	25.019	50.176	150.504	251.242	301.079	326.254
ea상 선간전압	24.999	50.005	149.818	250.303	300.107	324.936
평균 선간전압	24.860	49.723	149.206	248.853	298.436	323.271
검토 상/선간 전압비	0.85068	0.85105	0.85041	0.84995	0.85001	0.84959

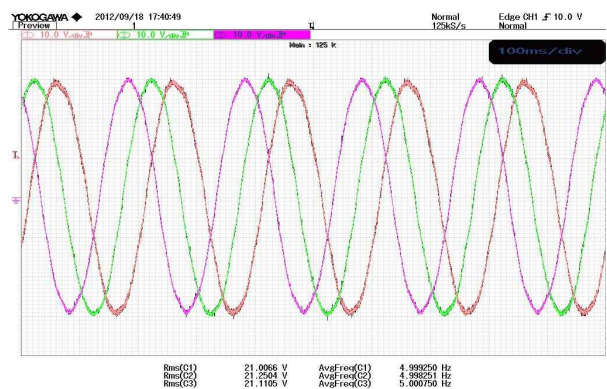
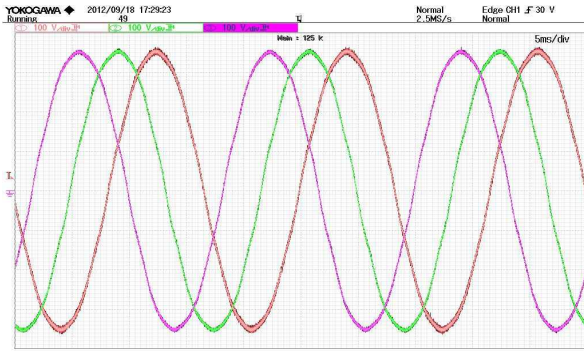
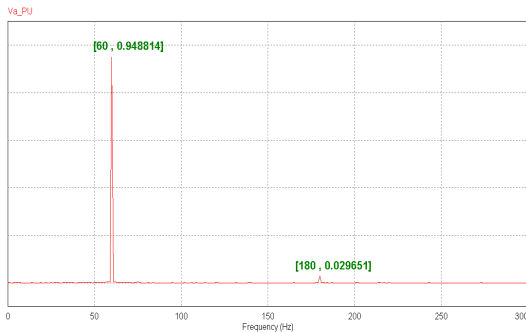


그림 6. 무부하시 5Hz에서 a, b, c상의 유도기전력의 상전압 파형

Fig. 6. Phase voltage waveform of induced EMF at a, b, c-phase at the 5Hz no-load



(a) a, b, c상의 유도기전력의 상전압 파형
(a) Phase voltage waveform at a, b, c-phase



(b) a상 역기전력의 FFT 고조파 분석결과
(b) FFT analysis result of a-phase back-EMF

그림 7. 무부하시 60Hz에서 유도기전력의 상전압 파형과 고조파 분석

Fig. 7. Phase voltage waveform and FFT analysis of induced EMF at the 60Hz no-load

4.2 저항부하에서 주파수 변화에 따른 운전특성

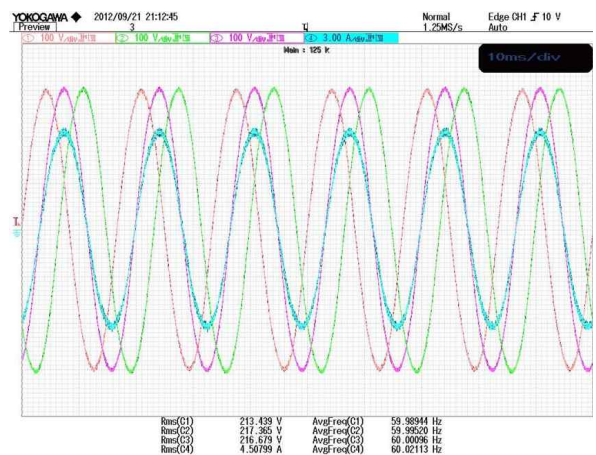
표 4는 발전기의 정격부하인 저항 50[Ω]을 5상 평형 Y결선으로 연결하여, 서보전동기의 회전수를 가변하여, 전원 주파수를 5Hz에서 65Hz까지 변화하였을 때, 각 상의 상전압과 선간전압 및 선전류의 크기를 각 상에서 측정된 값을 평균한 결과이다. 그림 8은 정격주파수인 60Hz에서 5상 평형 50[Ω] 부하에서 운전특성의 파형을 측정한 결과이다. 그림 (a)는 a, b, c상의 상전압과 a상 선전류의 파형이며, (b)는 오실로스코프를 사용하여 a상 역기전력의 고조파 성분을 스펙트럼으로 분석한 결과이며, (c)는 a상 역기전력의 전압파형

이 가지는 고조파 성분을 분석한 결과이고, (d)는 a상 선전류의 파형이 가지는 고조파 성분을 분석한 결과이다.

표 4. 50[Ω] 저항부하에서 주파수 변화에 따른 발생기전력

Table 4. Induced electromotive force by variable frequency on resistive 50[Ω] load

구분	5Hz	10Hz	30Hz	50Hz	60Hz	65Hz	비고
a상 상전압	19.529	39.945	114.922	184.070	214.632	232.839	
b상 상전압	19.724	39.388	115.504	184.200	214.777	233.534	
c상 상전압	19.383	39.282	115.364	184.841	216.373	235.921	
d상 상전압	19.715	39.343	115.611	185.846	217.373	232.188	
e상 상전압	19.660	39.212	115.494	184.863	216.672	231.610	
상전압 평균	19.602	39.434	115.379	184.764	215.965	233.218	
ab 선간전압	22.921	46.767	134.376	218.681	260.327	267.395	
bc 선간전압	23.137	46.280	136.897	220.465	258.148	276.281	
cd 선간전압	23.132	46.249	137.011	221.446	260.150	278.859	
de 선간전압	23.4139	46.758	138.136	222.136	260.381	276.245	
ea 선간전압	23.2022	45.949	134.323	217.907	250.675	265.769	
선간전압 평균	23.161	46.401	136.149	220.127	257.936	272.910	
a상 선전류	0.4007	0.7956	2.343	3.751	4.396	4.793	
b상 선전류	0.4159	0.7986	2.290	3.670	4.280	4.565	
c상 선전류	0.3989	0.7889	2.272	3.644	4.257	4.540	
d상 선전류	0.4040	0.8110	2.393	3.850	4.493	4.795	
e상 선전류	0.4140	0.8211	2.402	3.860	4.508	4.815	
전류평균	0.407	0.803	2.340	3.755	4.387	4.702	
상/선간 전압비	0.84634	0.84985	0.84745	0.83935	0.83728	0.85456	0.85

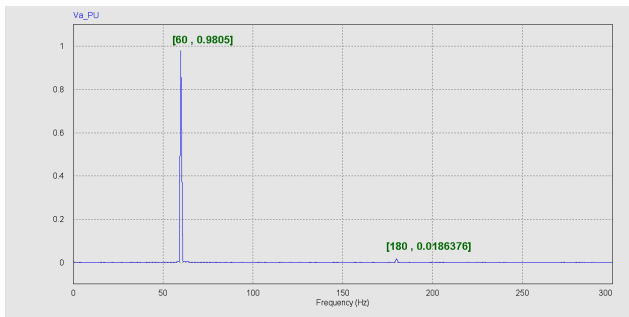


(a) a, b, c 상의 상전압 및 a상 선전류의 파형
(a) Waveform of a, b, c-phase voltage and a-phase line current

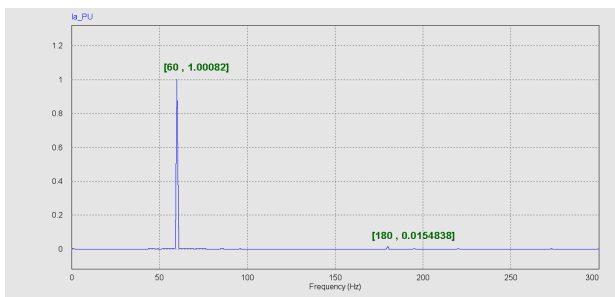
5상 5kW 표면부착형 영구자석 동기발전기 특성개선



(b) 오실로스코프에 의한 a상 역기전력의 고조파 스펙트럼
(b) FFT spectrum analysis of a-phase back-EMF by oscilloscope



(c) a상 역기전력의 고조파 분석 결과
(c) FFT analysis result at a-phase back-EMF



(d) a상 선전류의 고조파 분석 결과
(d) FFT analysis result at a-phase line current

그림 8. 60Hz 5상 평형 50[Ω]의 정격부하에서 운전특성 결과

Fig. 8. Rated operating results of 60Hz and balanced 5-phase resistive 50[Ω] load

4.3 5상 농형 유도전동기 시험 특성

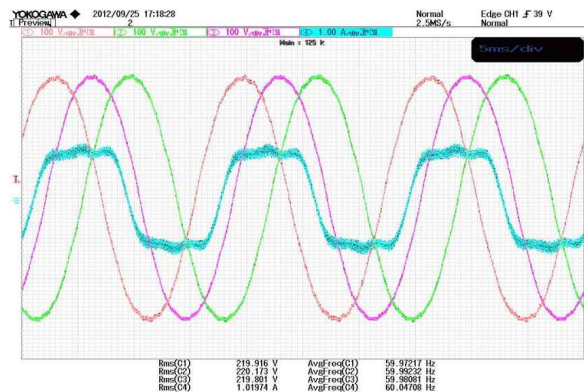
재설계하여 제작된 발전기를 시험하기 위하여 실험용으로 개발된 1.5kW 5상 농형 유도전동기를 부

하로 사용하여 특성시험을 실시하였다. 표 5에서는 전동기의 무부하 및 구속시험에서 주파수 변화에 따른 a, b, c상에서 발생하는 기전력과 a상의 선전류를 측정된 결과를 보여준다. 그림 9는 전동기 특성시험인 무부하 시험시 전동기의 운전특성의 파형을 관측한 것이다. 그림 (a)는 a, b, c상의 역기전력과 a상의 선전류 파형이며, (b)는 a상 역기전력의 파형에 포함된 고조파 성분을 분석한 결과이며, (c)는 a상 선전류의 파형에 포함된 고조파 성분을 분석한 결과를 보여준다.

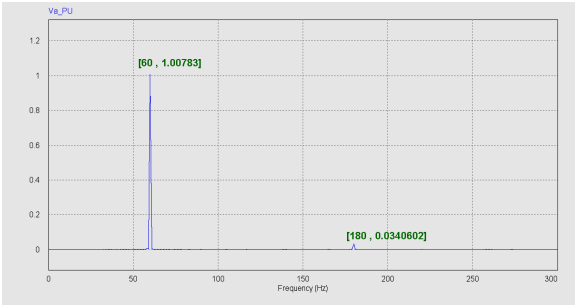
표 5. 전동기 무부하 및 구속시험 에서 주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력

Table 5. Induced electromotive force by variable frequency on no-load and locked rotor test

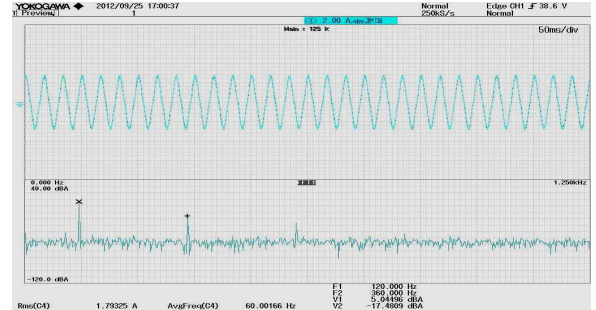
구분	10Hz	30Hz	60Hz	65Hz	비고	
무부하 시험	a상 상전압	36.152	109.750	219.916	233.883	
	b상 상전압	36.303	110.053	220.173	234.051	
	c상 상전압	36.136	109.887	219.801	243.659	
	상전압 평균	36.20	109.90	219.96	237.20	
	a상 선전류	0.9293	0.9976	1.0197	0.9861	
구속 시험	a상 상전압	28.696	35.048	48.091	51.171	
	b상 상전압	28.783	34.779	47.990	52.458	
	c상 상전압	28.593	24.790	47.896	52.940	
	상전압 평균	28.69	31.54	47.99	52.19	
	a상 선전류	2.07218	2.0354	1.7930	21.113	



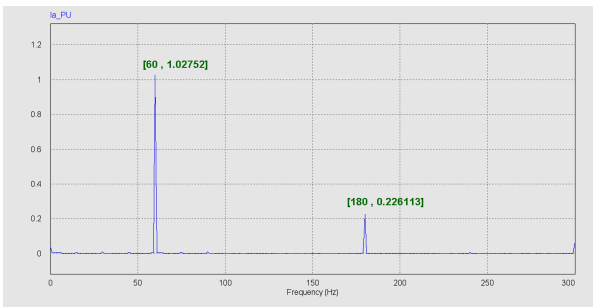
(a) a, b, c상의 역기전력과 a상의 선전류 파형
(a) Waveform of induced EMF at a, b, c-phase and a-phase line current



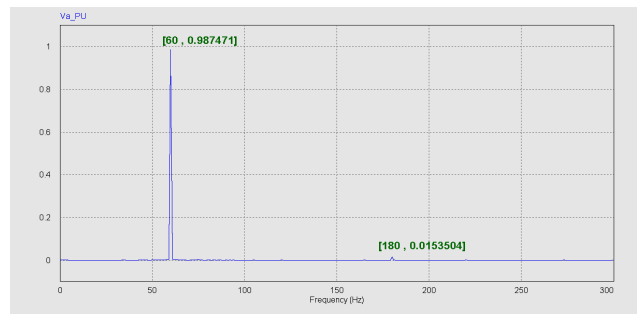
(b) a상 역기전력의 고조파 분석결과
(b) FFT analysis result at a-phase back-EMF



(b) a상 전류의 고조파 스펙트럼 분석
(b) Spectrum analysis of a-phase line current



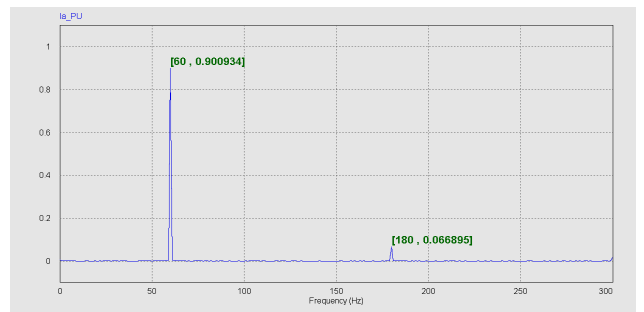
(c) a상 선전류의 고조파 분석결과
(c) FFT analysis result at a-phase line current



(c) a상 역기전력의 고조파 분석
(c) FFT analysis result at a-phase back-EMF

그림 9. 무부하 시험에서 운전특성
Fig. 9. Operating characteristics at no-load test

그림 10은 전동기 구속시험에서 운전특성을 보여준다. 그림 (a)는 a, b, c 상의 상전압 및 a상 선전류의 파형이며, (b)는 a상 선전류의 파형을 오실로스코프를 사용하여 스펙트럼 분석한 결과이며, (c)는 a상 역기전력의 파형에 포함된 고조파 성분을 분석한 결과이며, (d)는 a상 선전류의 파형에 포함된 고조파 성분을 분석한 결과를 보여준다.

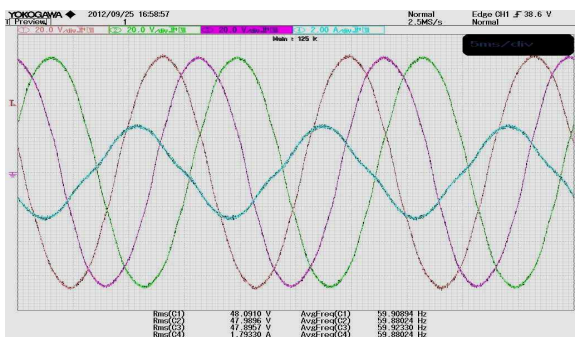


(d) a상 선전류의 고조파 분석결과
(d) FFT analysis result at a-phase line current

그림 10. 구속시험에서 운전특성
Fig. 10. Operating characteristics at locked rotor test

5. SPMSG의 특성 실험 결과

그림 5와 같은 실험 장치에서 저항부하를 연결하였을 때, 서보전동기의 입력은 표 6과 같이 측정되었으며, 이 측정된 값을 사용하여 서보전동기 효율이 89%인 경우 기계적인 출력이 5,251W가 되므로 서보전동기의 손실은 649W이다.



(a) a, b, c 상의 상전압 및 a상 선전류의 파형
(a) Waveform of a, b, c-phase voltage and a-phase line current

5상 5kW 표면부착형 영구자석 동기발전기 특성개선

표 6. 3상 서보 전동기의 입력 특성 측정
Table 6. Measured input characteristics of 3-phase servo motor

구분	상 전압 V	선 전류 A	입력 역율 %	유효 전력 W	피상 전력 VA	무효 전력 Var	효율 %	RPM rpm	
측정	a상	84.10	59.59	0.40	2,020	5,310	4,790	89	900
	b상	83.47	58.53	0.40	1,980	4,890	4,680	89	900
	c상	84.13	57.75	0.41	1,900	5,240	4,600	89	900
계산 및 검토	83.90	58.62	0.40	5,900	15,440	14,070	89	60Hz	

표 7은 서보 전동기의 특성을 계산한 결과이다. 발전기의 출력특성을 측정하기 위하여 저항부하를 연결하여 측정된 출력은 4,737W가 얻어졌다. 이때 발전기에서 측정된 출력특성은 표 8과 같다. 따라서 표 9는 시작품으로 제작된 SPMSG의 특성과 재설계에 의하여 개선한 발전기의 운전특성을 비교한 것이다.

재설계하여 제작 개발된 5상 5Kw SPMSG의 운전 특성을 검토하여 재정리하면 다음과 같이 요약된다.

표 7. 3상 서보전동기의 입출력 계산
Table 7. Calculated input and output of 3-phase servo motor

구분	전기적 입력 W	효율 %	전동기 기계적 출력 W	서보 전동기 손실 W	발전기 기계적인 입력 W
측정	5,900	89.0	5,251	649	5,251
비고	원동기 입력	서보전동기	원동기 출력	입력-출력	원동기 출력

표 8. 저항부하에서 SPMSG의 출력 특성
Table 8. Output characteristics of SPMSG at resistive load

구분	상전압 V	선간전압 V	선 전류 A	5상 전력 W	역율 %	효율 %	발전기 입력 W
측정	215.965	257.938	4.387	4737.19	100	90.2	5,251
비고	측정	측정	측정	측정	저항 부하	계산	서보 출력

표 9. 개선된 특성 비교표
Table 9. Comparison of improved specifications

구분	고정자편선		부부하			정격부하 50Ω (100.02 인 경우)		1차 전류	역율	효율	전압 변동률	THD %		
	권선 특성	R_s Ω	X_{ls} mH	상 전압	선간 전압	전압 비	상 전압						선간전압	
1차	0.8x 45	4.700	39.23	233.7	279.2	0.837	1996 (219.8)	235.8 (258.6)	3.708 (2.006)	9.342	85.0	84.9	17.1 (6.3)	2.79
2차	0.65x48 0.70x48	4.139	27.12	233.7	238.4	0.850	2160 (234.0)	257.9 (282.6)	4.387 (2.405)	8.965	88.0	90.2	17.5 (8.4)	1.85

각 주파수에서 발생하는 상전압과 선간전압의 진폭 비가 0.8500이므로, 이론적인 값 0.8506 (=1/1.1756)에 아주 근접됨을 알 수 있다.

무부하 상태에서 주파수 5Hz와 60Hz인 경우 발생하는 측정된 역기전력의 파형은 그림 6과 7에서 보여 주었다. 이 역기전력의 파형을 사용하여 고조파 분석한 결과는 그림 8이다. 따라서 무부하 60Hz에서 측정된 기본파 성분은 94.88%이며, 총 고조파 성분은 5.12%임을 알 수 있다. 이때 제3 고조파 성분은 2.97%이다.

그림 9에서 보는바와 같이 정격부하로 운전하였을 때, 유도기전력의 전압파형에 포함된 기본파 성분이 98.05%이므로 고조파 성분인 THD는 1.95%이다. 이때 제 3고조파 성분은 1.86%이므로 발전기에 포함되는 고조파 성분은 대부분 제3 고조파 성분임을 알 수 있다. 또한 전류에 포함된 제3고조파 성분은 1.55%이다.

그림 10에서, 전동기 무부하 시험시 전압에 포함된 제3고조파 성분은 3.41%이며, 전류에 포함된 제3고조파 성분은 22.61%이다.

그림 11에서, 전동기 구속 시험시 전압의 기본파 성분은 98.75%이므로 고조파 성분은 1.25%이다. 전류에 포함된 기본파 성분은 90.09%이며, 제3 고조파 성분은 6.68%이다.

표 8에서 보는바와 같이 재설계 의해 제작하여 개선한 2차 발전기의 효율은 90.2%이므로 크게 개선되었음을 알 수 있다.

6. 결 론

일반적으로 사용되고 있는 3상 교류 전동기 보다 많은 특성을 가지는 다상 교류전동기의 개발에 따른 운전특성을 연구 조사하기 위하여 설계 제작된 5상 220V, 60Hz, 5kW 표면부착형 영구자석 동기발전기 (SPMSG)의 운전특성을 개선한 결과를 보여 주었다. 원동기의 속도제어용인 서보전동기의 회전수 가변으로 출력주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력의 크기와 파형 및 출력 전압에 포함된 고조파 성분 분석을 통하여 개발된 발전기의 설계 및 제작 기술과 부하 변화에 따른 운전특성이 5상 교류전동기의 연구용 전 원장치로써 타당함을 보여 주었다.

앞으로 개발된 5상 발전기의 전원 특성을 활용하여 소형 5상 유도전동기 및 동기전동기(IPMSM) 개발에 있어 실제 전원공급용 장치로 사용하여 5상 및 다상 교류전동기의 대한 연구를 계속 진행할 예정이다.

References

- [1] Ayman S, Abdel-Khalik, Mahmoud I. Masoud, and Barry W. Williams, "Improved Flux Pattern With Third Harmonic Injection for Multiphase Induction Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, No. 3, pp. 1563-1758, March 2012.
- [2] Hyung-Woo Jung, Min-Huei Kim, Dong-Hee kim, "A Development of Surace Permanent magnetic Synchronous Generator for 5 Phase 5kW", JKIEE Vol. , No. , pp. , 2012. 11. 30.
- [3] Hyung-Woo Jung, Min-Huei Kim, Hyun-Jik Song, Dong-Hee kim, "An Operating Characteristics of Surface Permanent Magnetic Synchronous Generatorfor 5-Phase 5kW", JKIEE Vol. 27, No. 6, will be published 2013. 6. 30.
- [4] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, Won-Sik Baik, "A Five-Phase Induction Motor Speed Control System Excluding Effects of 3rd Current Harmonics Component", Journal of Power Electronics, Vol. 11, No. 3, pp.294-303, 2011. 05. 31.
- [5] Nam-Hun Kim and Min-Huei Kim, " Modified Direct Torque Control System of Five Phase Induction Motor" JEET, Vol/ 4, No. 2, pp. 266-271, 2009.
- [6] Min-Huei Kim and Sung-Un Choi, "A Direct Torque System for Improving Speed Response of Five Induction Motor, JKIEE, Vol. 26, No. 01, pp.66-74, 2012. 01. 31.
- [7] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, Won-Sik Baik, "A Five-Phase IM Vector Control System including of 3rd Current Harmonics Component", 8th International Conference on Power Electronics (ICPE2011-ECCE Asia), pp.294-303, 2011. 05. 30.
- [8] N. Bianchi, S. Bolognani, and M. D. Pre, "Strategies for the fault-tolerant current control of a five-phase permanent-magnet motor,"IEEE Trans. on Ind .Appl.,Vol. 43, No. 4, pp. 960 - 970, Jul./Aug. 2007.
- [9] M. J. Duran, F. Salas, and M. R. Arahal, "Bifurcation Analysis of Five-Phase Induction Motor Drives With Third Harmonic Injection," IEEE Trans. on Ind. Electron, Vol. 55 , No. 5, pp. 2006 - 2014, May 2008.
- [10] A. Iqbal, "Dynamic performance of a vector-controlled five-phase synchronous reluctance motor drive: an experimental investigation,"IET Electric Power Appl., Vol.2, No.5, pp.298 - 305, Sep. 2008.
- [11] Hyung-Min Ryu, Jang-Hwan Kim and Seung-Ki Sul, "Analysis of Multiphase Space Vector Pulse-Width Modulation Based on Multiple d-q Spaces Concept", IEEE Trans. on Power Electronics Vol. 20, No.6, pp. 1364-1371, November 2005.

- [12] Leila. Parsa and Hamid. A. Toliyat, "Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives for Ship Propulsion Applications," 2005 Electric Ship Technologies Symposium, pp. 371-378, 2005.
- [13] S. Sadeghi and L. Parsa, "Design and Dynamic Simulation of Five Phase Interior Permanent Magnet Machine for Series Hybrid Electric Vehicles," 2010 Green Technologies Conference, pp. 1 - 6, 2010.

◆ 저자소개 ◆



정형우 (鄭亨遇)

1961년 6월 23일생. 2006년 2월 경일대 전기과 졸업. 2008년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 동 대학원 전기공학과 박사 과정 수료. 1988~2000년 LG 산전 구매부 근무. 1991년 1월~현재 신한기전 대표. 2006년~현재 영남이공대학교 전기자동차과 겸임 교수.



김민희 (金玟熙)

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과 대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979년 3월~현재 영남이공대학교 전기자동차과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구 교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수논문상 수상. 현재 IEEE Senior Member. 1998~2006년 전력전자학회 이사, 부회장, 감사, 전동력응용연구회 위원장 역임. 현재 본 학회 중신회원.



송현직 (宋炫直)

1968년 7월 30일생. 1991년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1993년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2006년~현재 영남이공대학 전기자동차과 부교수. 현재 한국조명·전기설비학회 대구경북지회 이사.



김동희 (金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(박사). 1987~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장. 1999년 5월~2000년 4월 대한전기학회 전력전자연구회 간사장. 2000년 9월~2001년 2월 국립 Kyushu대 교환교수. 한국 조명·전기설비학회 학술위원. 현재 영남대 공대 전기공학과 교수.