

5상 5kW 표면부착형 영구자석 동기발전기 운전특성

(An 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 presents an operating characteristics of the 5-phase 5kW with developed the surface permanent magnetic synchronous generato (SPMSG) in order to make a study of a polyphase ac motors keeping hold of more advantages. There are shown a amplitude and waveform of the generated electromotive force, in FFT analysis of harmonics, within output voltages, and reviewing a experiment results in no-load test, resistive load, and inductive load using 5-phase induction motor by variable output frequency. The operating characteristics of the developed manufacturing generator include voltage regulation, efficiency, power factor, THD, and so on at rated load.

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

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 연구도 대단히 활발하게 진행되고 있다[1-8].

다상 전동기(polyphase motor)는 일반적인 단상 전

동기에 비해서 추가적인 자유도를 가진다는 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 산업분야에서 가장 많이 사용되고 있는 기존의 3상 전동기에 대비해서, 같은 출력에서 상당전압의 변화 없이 상당 전류의 크기를 감소시킬 수 있으며, 토크의 맥동주파수를 증가시킴으로써 토크 맥동을 저감할 수 있는 등의 다양한 장점을 가지고 있다[3, 9-16].

다상 전동기제어 시스템에 관한 연구를 위해서는 다상 교류전동기의 정확한 정수(파라메타) 추정과 운전 특성을 파악하는데 있어서 오차를 가져오는 등의 정확도에 어려움이 따르므로, 다상 교류전동기 제작에 대한 연구를 위해서는 고조파 성분이 적게 포함되는 품질이 우수한 다상 정현파 교류전원이 필요하게 된다[1, 3, 8].

이에 따라 본 연구에서는 5상 교류전동기의 기계적

* 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 : 2012년 10월 25일
1차심사 : 2012년 10월 30일, 2차심사 : 2013년 3월 26일
심사완료 : 2013년 4월 16일

인 특성을 조사하기 위하여 시험용으로 소형 5상 동기 발전기를 설계 제작하여 개발된 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG)의 운전 특성을 고찰하여 5상 전 동기 개발에 필요한 교류 전원장치로서의 타당성을 검토한다.

2. 제작된 5상 SPMSG 특성

5상 220V 60Hz 3.0kW급 소형 교류전동기 개발용 전원공급 장치로 사용하기 위하여, Maxwell 2D와 Simplorer를 사용하여 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG)를 개발하였다[1]. 설계 제작하여 개발된 5상 220V 60Hz 5.0kW SPMSG의 특성은 표 1과 같다.

표 1. 개발된 SPMSG의 특성
Table 1. Specifications of the developed SPMSG

구분	규격	구분	규격
정격출력	5.0Kw	고정자 외경	220mm
정격전압	220V	회전자 외경	119mm
정격전류	19.0A	공극	1.0mm
정격주파수	60Hz	적층 두께	85mm
극수	8극	고정자 슬롯 수	40개
정격회전수	900rpm	코일 그룹 수	20개
역율	85.0%	상당 고정자 코일	0.80mm×45turn
효율	84.9%	코일 배치	2층 분포권
보자력	12.800e	자성재료	Nd2Fe14B
잔유자기	13.100G	최대 B-H적	41.7MGOe
철심 재료	S-18	고정자권선 ($Z = R_s + jX_s$)	$4.70 + j14.79$ $L_s = 39.23 [mH]$

3. SPMSG 시험

개발된 발전기의 운전특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 개발된 5상 동기발전기(SPMSG)는 회전계자형으로 영구자석을 사용하기 때문에 자속을 가변할 수 없으므로 출력전

압을 가변할 수 없다. 따라서 발전기에서 발생하는 전압을 조정하기 위해 단상 전압조정기 5대를 연결하여 출력전압을 조정한다. 운전특성을 조사하기 위해서는 부하의 가변이 필요하며, 부하는 저항부하와 유도부하가 요구되므로, 이를 위해서 저항부하와 5상 농형 유도전동기를 병용하여 사용하도록 하였다. 전동기의 부하제어는 FFT 10 파워더 브레이크를 사용하여 제어하며, 출력의 전력과 토크 및 속도를 측정한다.

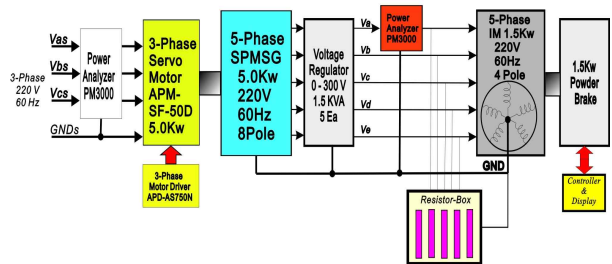


그림 1. 실험장치 블록도
Fig. 1. Block diagram of experimental apparatus

그림 2는 5상 5.0kW 동기발전기를 운전하기 위해, 원동기용으로 3상 서보 동기전동기(APM-SF-50D, 5.0kW)와 AC 서보 드라이버 APD-VS750N (7.5kW)을 사용한 시험용 시스템의 셋업 장치이며, 그림 3은 실험용에 적합한 부하저항의 외형이며, 그림 4는 실험 장치를 보여준다.

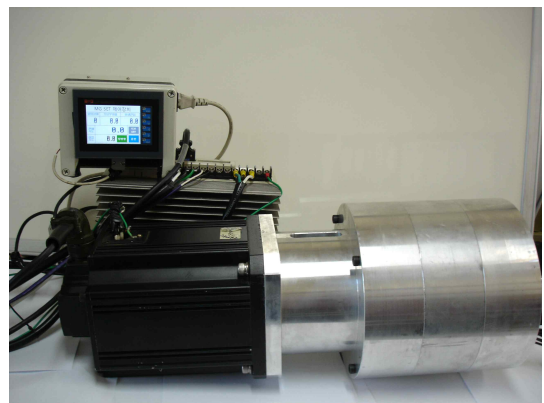


그림 2. 발전기 구동용 M-G 셋업 장치
Fig. 2. M-G setup apparatus for the generator driving

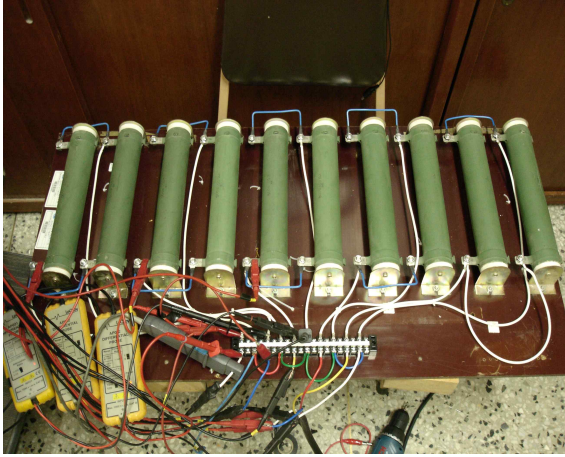


그림 3. 실험용 부하저항
 그림 3. Resistive load for the experiment

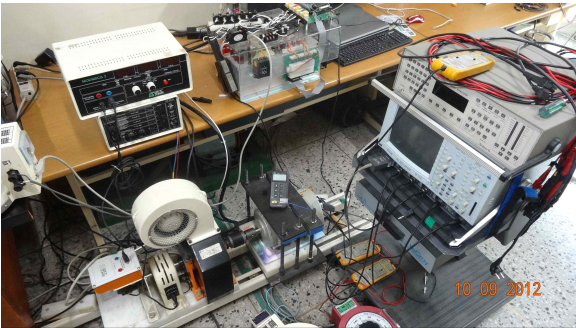


그림 4. 실험장치
 Fig. 4. Experimental setup

4. 개발된 발전기 운전특성

그림 1과 같이 구성된 장치를 사용하여 무부하시 서보전동기의 회전수 가변으로 전원주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력의 특성을 측정하며, 저항부하와 5상 농형유도전동기 부하에서 주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력의 부하특성을 조사한다.

4.1 무부하 특성

표 2는 원동기의 회전수를 가변시켜 전원주파수 변화에 따라 a, b, c, d상에서 발생하는 유도기전력인 상전압과 선간전압의 크기를 오실로스코프를 사용하여 실효값을 측정한 결과이다.

표 2. 무부하에서 주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력

Table 2. Induced electromotive force(EMF) by variable frequency on no-load

구분	5Hz	10Hz	30Hz	50Hz	60Hz	65Hz	
[상전압/선간전압]	(4.93/4.93)	(10.02/10.00)	(29.92/29.99)	(50.03/49.98)	(59.94/59.87)	(65.00/65.01)	
상 전압 V	a상	19.48	39.12	117.50	195.1	228.2	253.8
	b상	19.47	39.52	119.25	197.8	237.1	257.1
	c상	19.64	39.56	118.57	198.0	247.3	256.9
	d상	19.36	39.35	118.12	196.9	222.3	255.5
	평균	19.49	39.39	118.36	196.95	233.73	255.83
선간 전압 V	a상	22.80	46.24	139.4	230.9	278.4	300.5
	b상	22.76	46.57	140.0	232.0	279.1	301.4
	c상	23.21	46.75	141.0	233.2	281.0	302.7
	d상	22.65	46.26	140.0	231.3	278.1	299.8
	평균	22.86	46.46	140.10	231.85	279.15	301.10
상/선간 전압비	0.8526	0.8478	0.8448	0.8515	0.8373	0.8497	

그림 5와 6은 무부하시 5Hz에서 a, b, c, d상에서 발생하는 유도기전력의 상전압과 선간전압의 파형을 보여준다. 또한 그림 7은 정격 주파수인 60Hz에서 무부하시 각상에서 발생하는 유도기전력의 상전압 파형을 측정한 것이다. 그림 8은 무부하시 60Hz에서 발생하는 a, b, c, d상의 역기전력 파형을 관측한 결과이며, 이 파형의 a상을 사용하여 PSIM 프로그램을 이용하여 고조파 성분(FFT)을 분석한 결과는 그림 9에서 보여준다.

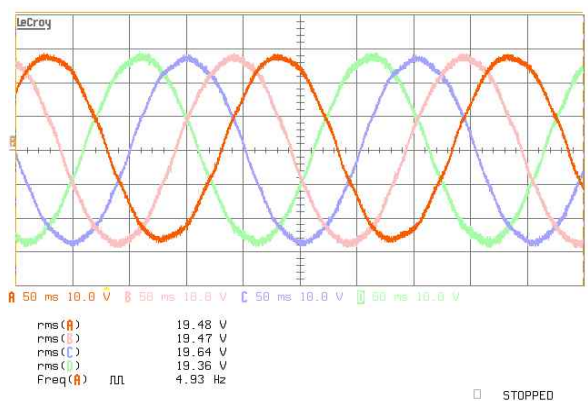


그림 5. 무부하시 5Hz에서 a, b, c, d상 발생 기전력의 상전압 파형

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

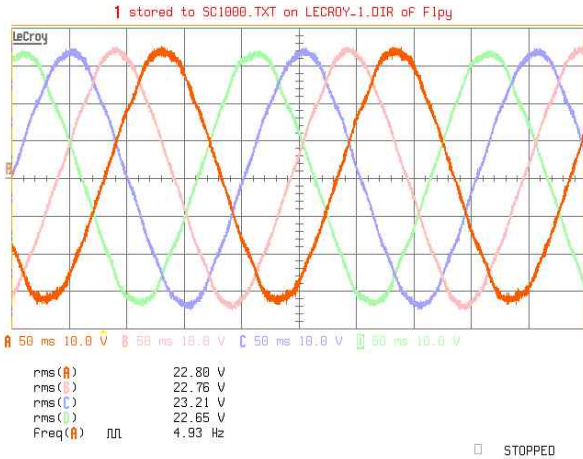


그림 6. 무부하시 5Hz에서 a, b, c, d상 발생 기전력의 선간전압 파형
 Fig. 6. Line to line voltage waveform of induced EMF at a, b, c-phase on the 5Hz no-load

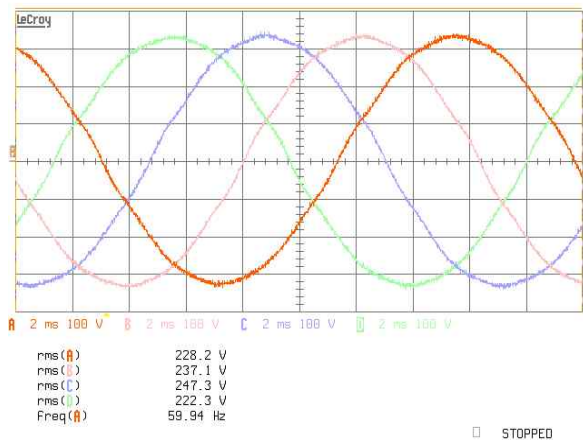


그림 7. 무부하시 60Hz에서 a, b, c, d상 발생 기전력의 상전압 파형
 Fig. 7. Phase voltage waveform of induced EMF at a, b, c-phase on the 60Hz no-load

4.2 저항부하 특성

발전기의 출력이 5.0kW이므로 정격전압이 220V인 경우 한 상당 부하 저항은 48.4Ω이 된다. 따라서 정격 부하에 근접하는 부하저항을 50Ω으로 설정하였으며, 이때 정격으로 운전할 때의 출력은 4.840kW가 된다.

표 3은 발전기의 부하저항을 50Ω으로 하여, 5상 평형 Y결선으로 연결하였을 때, 서보전동기의 회전수를

가변시켜, 전원주파수를 5Hz에서 65Hz까지 변화하였을 경우, a-b와 b-c 선간전압, b상의 상전압, a상의 선전류의 크기를 측정된 결과이다. 그림 10은 낮은 주파수 5Hz인 경우, 5상 평형 50Ω에서 a-b와 b-c상의 선간전압, b상 상전압 및 a상 선전류의 파형을 보여준다. 그림 11은 정격이 60Hz인 경우로, a-b상 선간전압(적색선), b-c상 선간전압(갈색선), b상의 상전압(청색선) 및 a상 선전류(녹색선)의 파형을 관측한 것이다.

표 3. 50 Ω 저항부하에서 주파수 변화에 따른 발생기전력

Table 3. Induced electromotive force by variable frequency on resistive 50 Ω load

구분/ Hz	5.01	10.02	29.98	50.06	60.01	65.02
ab선간 전압	21.15	42.52	125.16	199.6	235.8	245.9
b상 전압	18.07	35.98	105.87	168.9	199.6	215.8
bc선간 전압	21.46	42.64	126.69	203.8	240.1	263.8
a상 선전류	0.3356	0.6710	1.957	3.132	3.708	3.984

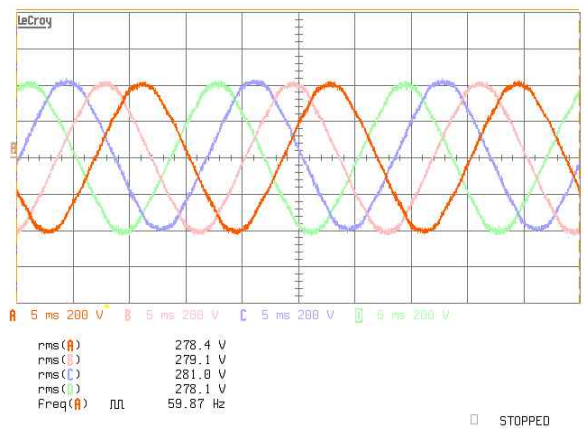
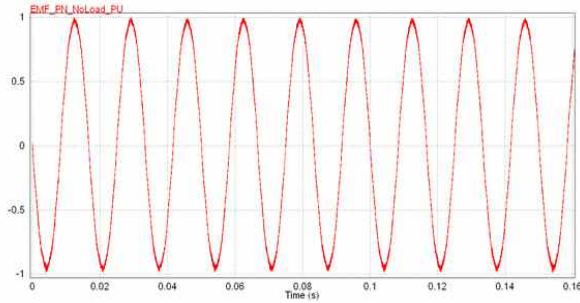
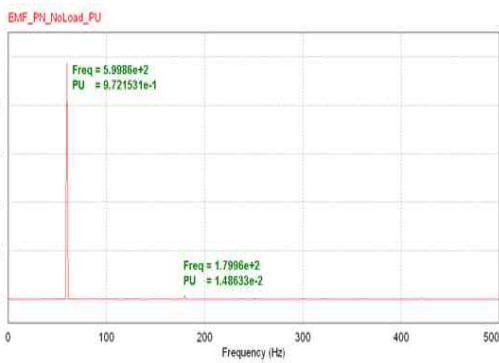


그림 8. 무부하시 60Hz에서 a, b, c, d상 발생 기전력의 선간전압 파형
 Fig. 8. Line to line voltage waveform of induced EMF at a, b, c-phase on the 60Hz no-load



(a) 역기전력의 파형
(a) Induced back-EMF waveform



(b) FFT 고조파 분석결과
(b) FFT analysis result

그림 9. 무부하 60Hz에서 발생하는 역기전력의 파형과 FFT 고조파 분석결과
Fig. 9. FFT analysis result of induced back-EMF waveform at 60Hz no-load

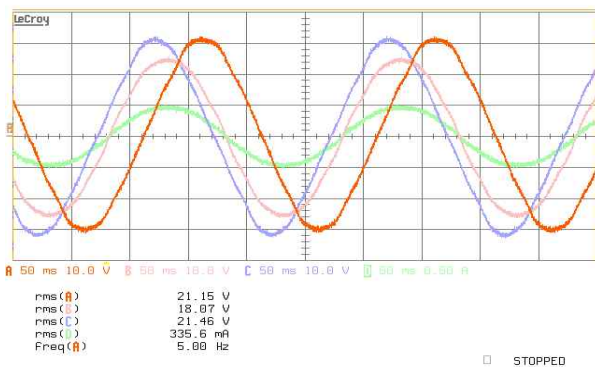


그림 10. 5Hz의 5상 평형 50Ω에서 a-b와 b-c 상의 선간전압, b상 상전압 및 a상 선전류의 파형
Fig. 10. Waveform of line to line voltage of a-b and b-c phase, b-phase voltage, and a-phase line current at 5Hz and balanced 5-phase resistive 50Ω load

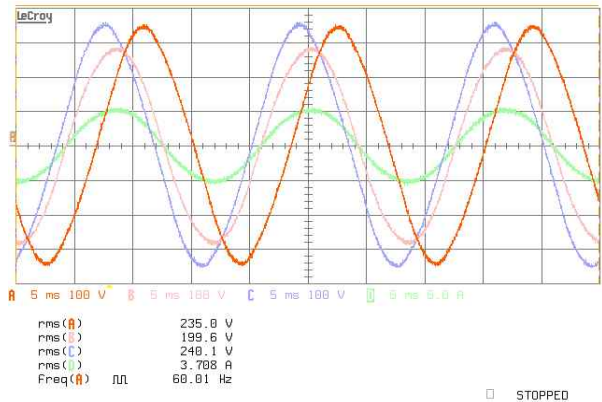


그림 11. 정격 60Hz의 5상 평형 50Ω에서 a-b와 b-c 상의 선간전압, b상 상전압 및 a상 선전류의 파형
Fig. 11. Waveform of line to line voltage of a-b and b-c phase, b-phase voltage, and a-phase line current at 60Hz and balanced 5-phase resistive 50Ω load

4.3 전동기 부하 특성

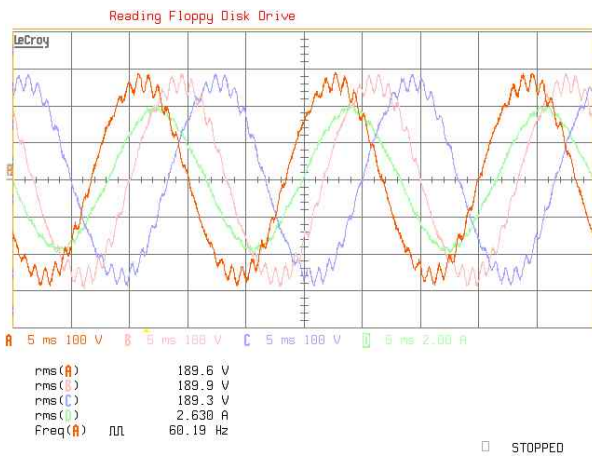
5상 발전기의 출력단자에 5상 220V, 60Hz, 1.5kW의 유도전동기를 부하로 사용하여 운전특성을 관측한 결과는 표 4와 같다.

표 4. 5상 농형 유도전동기 부하에서 운전특성
Table 4. Operating characteristics at the 5-phase squirrel-cage induction motor load

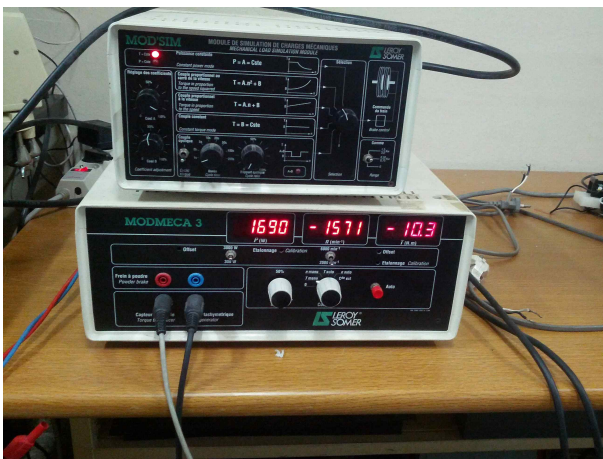
전동기 부하	공급전압 V	A상전류A	역률 %	입력 W	5상 전력 W	회전수rpm	토크 Nm	효율 %
무부하	220.0	0.940	0.06	62.4	0.752	1775	0	-
1/4 부하	217.0	0.975	0.75	793.4	504	1757	2.70	63.5
3/4 부하	212.4	1.318	0.85	1,187.5	1076	1717	6.00	90.6
정격 부하	207.0	1.885	0.85	1,767.1	1500	1650	7.95	84.9
130% 부하	189.6	2.630	0.87	2,169.1	1690	1571	10.30	77.5

그림 12는 발전기의 정격인 60Hz, 220V를 발생하는 유기기전력의 전원을 사용하여 전동기의 부하가

정격의 130%가 되는 10.30Nm을 인가하였을 때, 입력 단자전류가 상당 2.630A로, (a)는 a, b, c상의 상전압과 a상의 선전류 파형을 관측한 것이며, (b)는 부하의 출력과 회전수 및 토크를 측정하는 결과를 보여 주고 있다. 그림 4와 그림 12에서 사용된 측정장비는 Voltech PM 3000과 LeCroy LM474 오실로스코프 및 Leroy Somer FP.15/30 전동기 실험장치를 사용하였다. 또한 그림 13은 개발된 발전기의 효율특성을 보여준다.



(a) a, b, c상 전압파형과 a상 선전류 파형
(a) Waveform of a, b, c-phase and a-phase line current



(b) 출력과 회전수 및 토크 측정
(b) Measurement of out power, rpm, and torque

그림 12. 전동기의 130% 부하에서 운전특성
Fig. 12. Operating characteristics at 5-phase the motor with rated 130% load

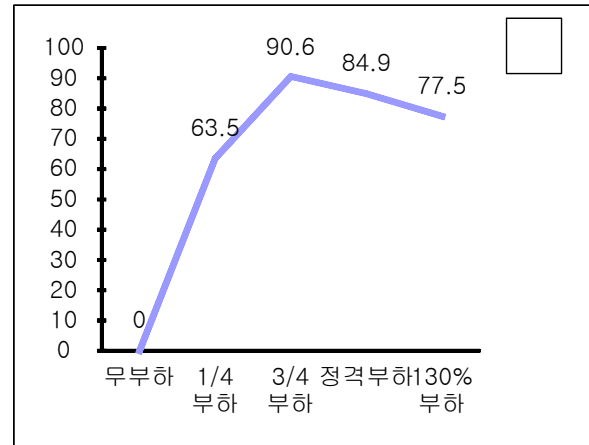


그림 13. 효율곡선
Fig. 13. Efficiency curve

5. 개발된 발전기의 특성 검토

설계하여 제작 개발된 SPMSG의 운전특성을 조사한 결과는 다음과 같이 요약된다.

설계 개발된 발전기의 특성은 표 1과 같다.

발전기에서 발생하는 유도기전력은 무부하시 전원 주파수가 5Hz에서 65Hz까지 선형적으로 변화되므로 잘 동작함을 알 수 있다.

각 주파수에서 발생하는 상전압과 선간전압의 비가 평균 0.85로 측정되었으며, 이는 이론적인 진폭의 비인 $0.8506 (=1/1.1756)$ 에 아주 근접됨을 알 수 있다.

정격 주파수인 60Hz에서 발생하는 측정된 역기전력의 파형을 FFT로 분석한 결과, 기본파 성분은 97.21%이며, 총 고조파 성분 THD는 2.79%임을 알 수 있다. 이때 제3 고조파 성분은 1.49%이다.

저항부하 특성을 관측한 결과는 표3에서 저항부하 50Ω을 각 상에 연결하였을 때, a-b, b-c상의 선간전압, b상의 상전압, a상의 선전류를 주파수 변화에 따른 특성을 보여준다. 그림 11은 이때 측정된 파형이다.

발전기의 정격인 60Hz에서 상전압이 199.6V이며, 한 상당 전류가 3.708A이므로 소비전력은 3.7KW가 된다. 이 소비전력은 정격부하의 3/4에 해당되는 경우로 취급할 수 있다. 이 부하에서 전압변동률은

17.10%이다. 따라서 개발된 발전기는 정격부하에서 출력되는 단자전압이 현저하게 저하됨을 알 수 있으며, 이에 대한 특성개선이 필요한 것으로 판단된다.

발전기의 개발 목적이 5상 교류전동기 개발을 위한 전원장치개발에 있으므로, 5상 220V 1.5kW 농형 유도전동기를 부하로 사용하였을 때, 측정된 운전특성은 표 4와 그림 12에서 보여 주고 있다. 이 특성은 5상 전동기의 운전결과이며, 특히 130%의 과부하 상태에서 전동기의 역기전력에 많은 고조파 성분이 포함하고 있음을 알 수 있다.

개발된 5상발전기의 효율특성은 그림 13에서 보여 준다.

6. 결 론

일반적으로 많이 사용되고 있는 3상 전동기 보다 많은 특성과 장점을 가지는 다상 교류전동기의 운전특성을 연구하기 위해서는 고조파 성분이 적고 품질이 우수한 정현파 다상 교류전원이 필요하게 된다. 이에 따라 교류전동기 및 발전기 해석 프로그램을 활용하여 개발된 5상 220V 5kW 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG)의 운전특성을 고찰하였다. 개발된 SPMSG의 운전특성을 고찰한 결과, 효율, 역율, 전압변동률, 유기기전력에 포함된 THD 등을 고려하면 5상 전동기 개발에 필요한 교류 전원장치로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

References

[1] Hyung-Woo Jung, Min-Huei Kim, Dong-Hee Kim, "A Development for Surface Permanent Magnetic Synchronous Generator(SPMSG) of 5-Phase 5kW", Journal of KIIE, Vol. 26, No. 01, pp. 87-96, 2012. 01. 31.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Min-Huei Kim, Sung-Un Choi, "A Direct Torque Control System for Improving Speed Response of Five-Phase Induction Motor", Journal of KIIE, 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] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, Won-Sik Baik, "The Modified Direct Torque Control System for Five-Phase Induction motor Drives", Journal of KIIE, Vol. 23, No.02, pp.138-147, 2009. 02. 25.

[9] 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.

[10] E. Levi, M. Jones, S. N. Vukosavic, and H. A. Toliyat, "Steady-state modeling of series-connected five-phase and six-phase two-motor drives," IEEE Trans. on Industry Application, Vol.44, No.5, Sep./Oct. 2008.

[11] H.M. Ryu, J. H. Kim, and S. K. 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, Nov. 2005.

[12] 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.

[13] H. Xu, H.A. Toliyat "Five-phase Induction Motor Drives With DSP-Based Control System" IEEE Trans on Power Electronics vol. 13, No.4, July 2002.

[14] L. Parsa and H. M. Toliyat, "Five-phase permanent magnet motor drives," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.41, No.1, pp.30 - 37, Jan./Feb. 2005.

[15] H. A. Toliyat, "Analysis and simulation of five-phase variable speed induction motor drives under asymmetrical connections," IEEE Trans. Power Electronics, Vol.13, No.4, pp.748-756, Jul.1998.

[16] 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.

◇ 저자소개 ◇



정형우 (鄭亨遇)

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

겸임교수.



김민회 (金玟會)

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979년 3월~현재 영남이공대학교 전기자동화과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시

주립대학 전기공학과 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 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 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2006년~현재 영남이공대학 전기자동화과 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. 한국조명·전기비학회 학술위원. 현재 영남대 공대 전기공학과 교수.