

5상 5KW 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG) 개발

(A Development of Surface Permanent Mount Synchronous Generator for 5 Phase 5KW)

정형우* · 김민희 · 김동희**

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

Abstract

This paper propose a development of surface permanent mount synchronous generator(SPMSG) for 5-phase 5Kw in order to study a polyphase ac machinery that keep hold of advantages more than traditional three-phase squirrel-cage induction motor, such as reducing a amplitude of torque pulsation decreasing electric noises, and increasing the reliability. Design methods of the generator use a development tools with Maxwell 2D and Simplorer. There are designed drawing of manufactured frames of the SPMSG. A amplitude and waveform of the generated electromotive force, FFT analysis of harmonics within output voltages, and reviewing a experiment results are shown by variable output frequency. We are presenting a design and manufacture methods for the SPMSG

Key Words : Five-Phase, SPMSG, Generator Design, 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 연구도 대단히 활발하게 진행되고 있다[1-6].

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, (1) 같은 출력에서 상당전압의 변화 없이 상당 전류의 크기 저감, (2) 토크의 맥동주파수를 증가시킴으로써 토크 맥동 감소, (3) 인버터의 직류 링크전류에 고조파 성분을 저장하여 회전자의 고조파 성분 감소, (4) 전동기의 정격전력 변화 없이 상당 토크 크기 감소, (5) 높은 전류 밀도 공급이 가능하여 출력 토크의 크기 증가, (6) 시스템의 신뢰성을 증가 시킬 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 제작한

* 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 9월 11일
1차심사 : 2012년 9월 15일
심사완료 : 2012년 11월 16일

다. 집중권을 가지는 전동기에서는 공극자속이 정현파 형태가 아닌 사다리꼴 형태의 파형으로 나타나게 되므로, 전동기에서 발생하는 역기전력도 사다리꼴 형태의 파형이 된다. 정현파 형태의 공극자속 분포를 지닌 전동기에서는 코어의 일부분에서만 포화현상이 나타나므로, 공극의 자속밀도가 사다리꼴 형태의 파형을 가지는 경우에는 코어 활용도가 높아질 수 있다. 따라서 3상 전동기에 비해 5상 전동기는 구조적인 관점에서 2가지의 큰 차이점을 가지고 있다. 첫 번째로는 분포권을 사용하지 않고 집중권을 사용하며, 두 번째는 3차 공간 고조파 성분을 포함하고 있으므로 사다리꼴 형태의 역기전력이 나타나는 확연한 차이를 지니게 된다[9-12].

다상 전동기 제어 시스템의 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[13].

이에 따라 본 연구에서는 5상 교류전동기의 기계적인 특성을 조사하기 위한 전원시스템으로 시험용인 소형 5상 동기발전기를 설계 제작하여 개발하였으며, 연구 개발된 표면부착형 영구자석 동기발전기(Surface Permanent Mount Synchronous Generator, SPMSG)의 설계 및 제작기술에 따른 운전 특성을 고찰 하였다.

2. 5상 발전기의 수학적 모델

2.1 전압방정식

5상 2극 발전기 고정자 권선의 각 상은 공간적으로 72도의 위상차를 가진 N턴 집중권으로 구성되는 경

우, 고정자 권선분포도는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 이때 권선의 역기전력과 전류파형은 그림 2에서 보는 바와 같이 역기전력은 사다리꼴 형태로, 전류는 제 3고조파 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다[2].

5상 발전기의 a상에서 발생하는 기전력인 상전압 V_a 가 식 (1)과 같이 표시되면, b상의 상전압 V_b 는 식 (2)로, 선간전압 V_{ab} 는 식 (3)으로 표현된다. 이때 선간전압의 진폭 크기 $|V_{ab}|$ 는 식 (4)와 같이 상전압의 1.1756배가 되며, 위상은 상전압 보다 54° 빠른 특성을 가진다.

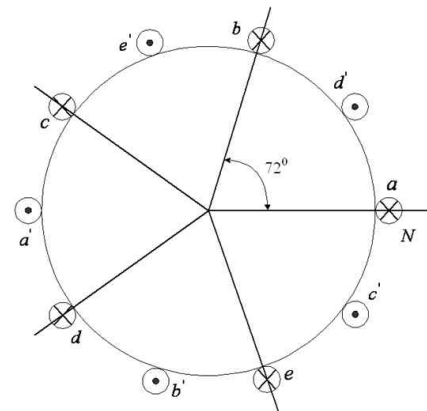


그림 1. 집중권으로 구성된 5상 발전기의 권선 분포도
Fig. 1. Five-phase concentrated winding of AC generator

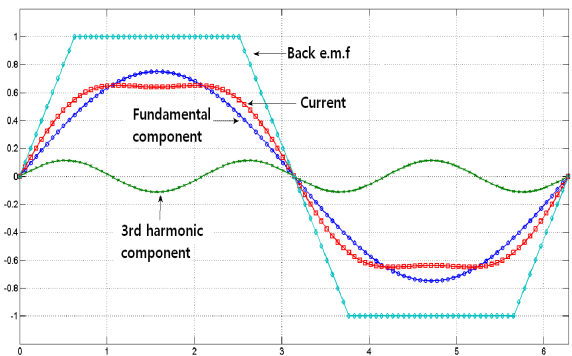


그림 2. 5상 발전기의 역기전압과 전류파형
Fig. 2. Back-EMF and current waveform of five-phase AC generator

$$V_a = V_{S_{rms}} \sin \omega t \tag{1}$$

$$V_b = V_{S_{rms}} \sin (\omega t - 72^\circ) \tag{2}$$

$$V_{ab} = 1.1756 \times V_{Srms} \sin(\omega t + 54^\circ) \quad (3)$$

$$|V_{abl}| = V_a - V_b = 2 \times \cos(54^\circ) \times V_{Srms} = 1.1756 V_{Srms} \quad (4)$$

여기서 V_{Srms} 는 임이의 실효치 전압이다.

5상 유도전동기에서 수학적 모델은 a b c d e의 기준 좌표계상에서 행렬 형태로 간략히 표현될 수 있으며, 고정자 전압 및 쇄교자속 방정식은 식 (5)와 (6)으로 표시된다[2].

$$V_{abcde} = R_s I_{abcde} + \frac{d\lambda_{abcde}}{dt} \quad (5)$$

$$\lambda_{abcde} = L_s I_{abcde} + L_{sr} I_{abced} \quad (6)$$

또한 회전자 전압 및 쇄교자속 방정식은 식 (7)과 (8)로 표시된다.

$$V_{abced} = R_r I_{abced} + \frac{d\lambda_{abced}}{dt} \quad (7)$$

$$\lambda_{abced} = L_{sr}^T I_{abcde} + L_{rr} I_{abced} \quad (8)$$

따라서 5상 유도전동기의 토크는 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{P}{2} I_{abcde}^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_{abced} \quad (9)$$

여기에서 사용되는 기호와 관련 수식들은 참고문헌 [2]에서 언급된다.

2.2 고조파 해석

5상 발전기의 고조파 성분을 해석하기 위하여, 정상상태에서 자계의 중첩 허용을 위해 포화현상과 포피효과를 무시하면, 그림 3과 같이 a상 좌표축의 권선함수 $N(\phi)$ 는 식 (10)으로, 전류파형은 식 (11), 이때 3상 합성 기자력은 식 (12)으로 표시된다 [13-16].

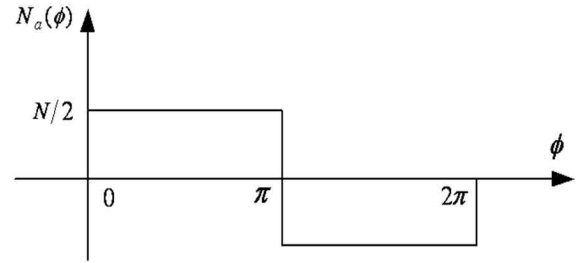


그림 3. 5상 발전기의 a상 권선함수
Fig. 3. Winding function for phase "a" of five-phase AC generator

$$N(\phi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4}{n\pi}\right) \left(\frac{N}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos n(\phi + \alpha), n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

$$i_a(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{4}{m\pi}\right) I_m \cos(m\beta) \sin(m\theta + \delta), m = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F &= N_a I_a + N_b I_b + N_c I_c + N_d I_d + N_e I_e \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{1}{nm}\right) \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \left(\frac{NI_m}{2}\right) \cos\left(\frac{m\pi}{10}\right) ((\cos(m\omega t - n\psi) \\ &\quad (\cos \frac{(m-n)2\pi}{5} + \cos \frac{(m-n)4\pi}{5} + \frac{1}{2})) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\theta = \omega t$, $\beta = \pi/10$, δ 는 임이의 위상각, ϕ 는 공간각도, α 는 상과 상 사이의 공간상 각도이며, n, m 은 고조파의 차수이다.

3. SPMSG 설계

5상 220V 60Hz 3.0Kw 소형 교류전동기의 실험용 전원장치로 설계 및 제작기술이 보다 쉬운 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG)로 개발하였다. 설계에 적용한 이론적인 측면과 기법은 Maxwell 방정식과 유한요소법을 적용하는 교류전동기 및 발전기 해석 프로그램인 Maxwell 2D/3D를 활용하였다. 또한 설계된 자료를 사용하여 Simplorer 프로그램으로 시행오차를 거쳐 시뮬레이션을 실시하였다[17]. 최종적으로 설계 개발된 5상 220V 60Hz 5.0Kw SPMSG의

특성은 표 1과 같다.

그림 4는 설계된 SPMSG의 고정자와 회전자의 형상과 자속밀도의 분포도를 보여주며, 그림 5는 발전기 운전에서 시뮬레이션에 의한 자기해석과 동작의 결과를 보여준다.

설계된 고정자의 슬롯은 40개로, 한 상당 2개의 도체를 2층 분포권으로 배치할 수 있도록 설계하였으며, 슬롯의 형태는 그림 6과 같다. 또한 회전자의 자극 구조는 8극으로 그림 7과 같이 설계되었다. 철심은 S-18을, 회전자의 자성재료는 Nd2Fe14B를 사용하였다. 그림 8은 설계된 5상 SPMSG의 외형이다. 그림 9는 코일 직경 0.8mm, 45turn, 권선피치 5mm을 8극 2층 분포권으로 배치한 고정자 권선의 전개도이다.

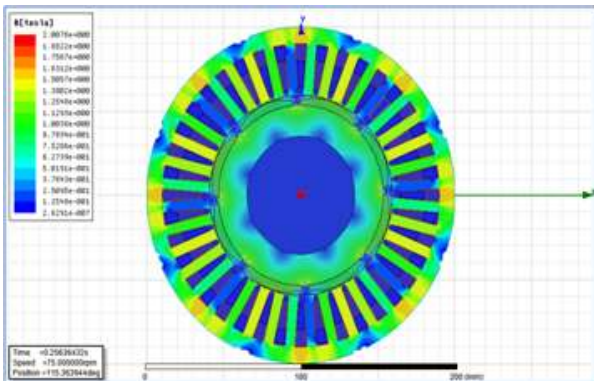


그림 4. 설계된 고정자와 회전자의 자속밀도 분포도
Fig. 4. Distributed flux density on designed stator and rotor of the generator

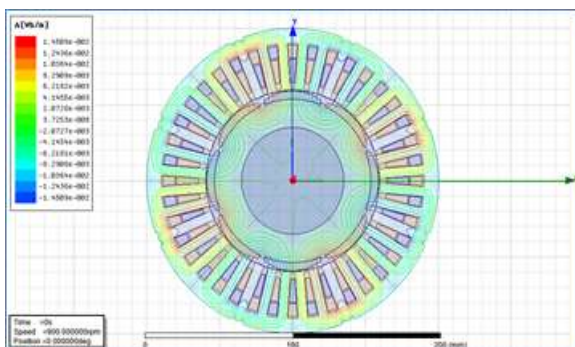


그림 5. 설계된 발전기의 운전에서 따른 자기해석과 동작
Fig. 5. Analysis of electromagnetic field and operating for designed generator driving

표 1. 설계된 SPMSG의 특성

Table 1. The specifications of designed 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	0.8mm×45turn
효율	81.2%	코일 배치	2층 분포권
자극 보자력	12.800e	자성재료	Nd2Fe14B
자극 점유자기	13.100G	최대 B-H적	41.7MGOe
철심 재료	S-18	고정자권선 ($Z = R_s + jX_s$)	$4.70 + j14.79$ (100Hz에서) $L_s = 39.23[mH]$

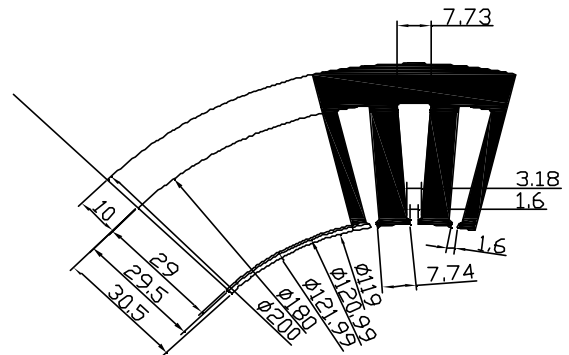


그림 6. 설계된 고정자 슬롯 형태
Fig. 6. Slot structure of designed stator

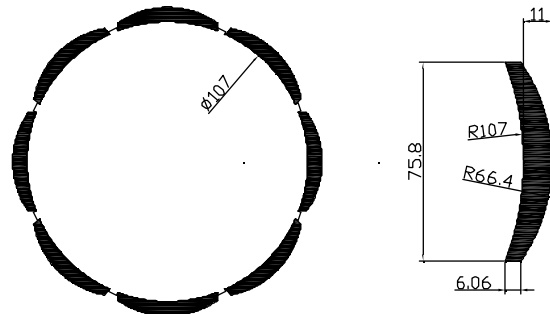


그림 7. 설계된 8극 회전자 자극 구조
Fig. 7. Structure of designed 8-pole rotor

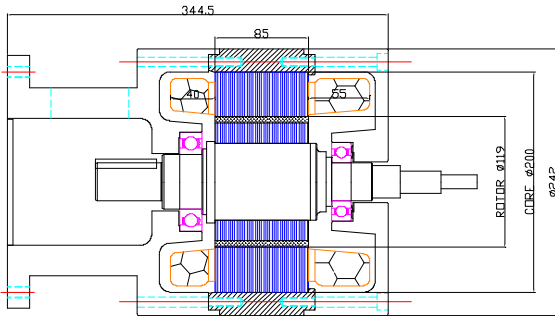


그림 8. 개발된 5상 SPMSG의 전체 외형
Fig. 8. Whole structure of designed 5-phase SPMSG

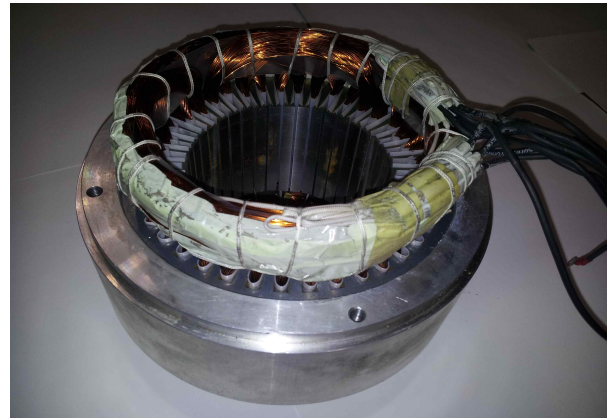


그림 10. 제작된 고정자 권선
Fig. 10. Manufactured stator winding

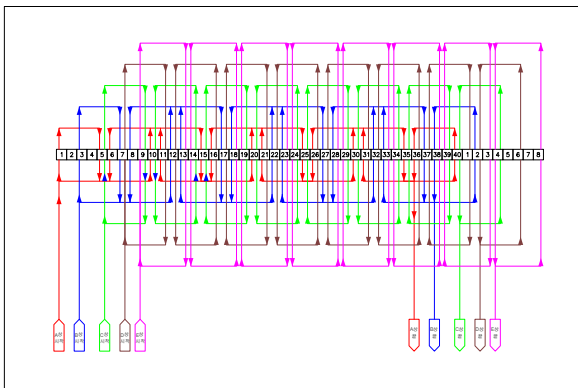


그림 9. 5상 고정자 권선 전개도(8극, 2층 분포권)
Fig. 9. Winding connection diagram of 5-phase stator(8-pole, 2 layer and distributed winding)



그림 11. 제작된 회전자의 자극 형태
Fig. 11. Pole shape of manufactured rotor

4. SPMSG 제작 결과

그림 10~12는 설계된 자료를 기본으로 제작된 SPMSG의 외형 사진이다. 5상 5.0KW 발전기를 운전하기 위해 원동기용으로 3상 서보 동기전동기 (APM-SF-50D, 5.0KW)와 AC 서보 드라이버 APD-VS750N(7.5KW)을 사용하여 시험시스템의 셋업 장치를 구성하였다.

5. 개발된 발전기 특성

개발된 발전기의 특성을 조사하기 위하여 다음과 같



그림 12. 제작된 SPMSG의 외형
Fig. 12. Structured shape of SPMSG

이 무부하시 원동기 회전수 가변에 따라 전원주파수 변화에 의해 발생하는 유도기전력의 특성을 측정하였으며, 저항 부하에서 주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력의 부하특성을 조사하였다.

5.1 무부하시 전원 주파수 가변에 따른 발생 기전력 특성

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

그림 13과 14는 무부하시 5Hz에서 a, b, c, d상에서 발생된 유기기전력의 상전압과 선간전압의 파형을 보여준다. 또한 그림 15는 정격 회전수인 60Hz에서 무부하시 각상에서 발생하는 기전력의 상전압 파형을 측정한 것이다.

그림 16는 60Hz의 무부하 상태에서 발생하는 a상의 역기전력 파형을 관측한 결과이며, 이 파형을 사용하여 고조파 성분을 분석한 결과는 그림 17에서 보여준다.

표 2. 무부하에서 원동기 회전수 변화에 따른 발생 기전력

Table 2. Induced electromotive force(EMF) by variable speed of motor on no-load

구분	5Hz	10Hz	30Hz	50Hz	60Hz	65Hz	비고
[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)	
상전압 Vrms	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	233.72	255.82
선간 전압 Vrms	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	46.45	140.10	231.85	279.15	301.10
상전압/ 선간전압 비	0.8526	0.8478	0.8448	0.8515	0.8373	0.8497	0.85 (평균)

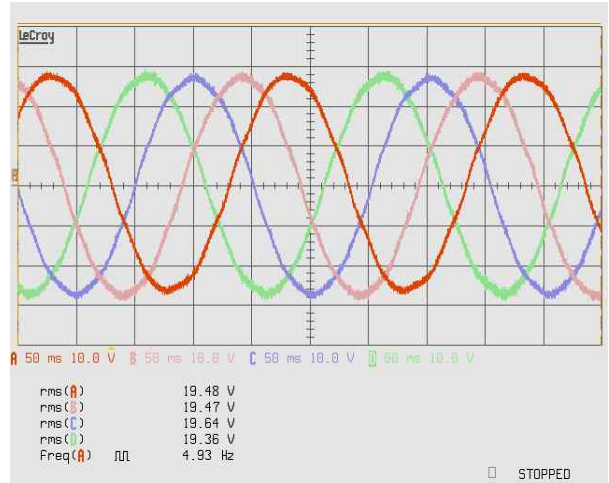


그림 13. 무부하시 5Hz에서 a, b, c, d상 발생 기전력의 상전압 파형

Fig. 13. Phase voltage waveform of induced EMF with phase "a", "b", "c", "d", "e" on the 5Hz and no-load.

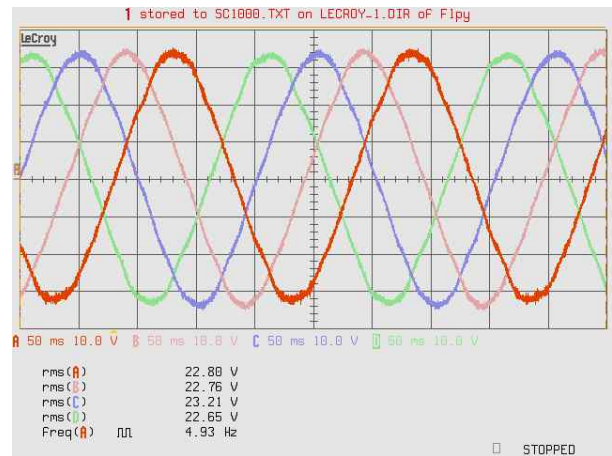


그림 14. 무부하시 5Hz에서 a, b, c, d상 발생 기전력의 선간전압 파형

Fig. 14. Line to line voltage waveform of induced EMF with phase "a", "b", "c", "d", "e" on the 5Hz and no-load.

5.2 저항 부하변화에서 주파수 변화에 따른 운전특성

표 3은 저항 100[Ω]을 5상 평형 Y결선으로 연결 하였을 때, 원동기의 회전수를 가변하여 전원주파수를 5Hz에서 65Hz까지 변화하였을 때 따른 b상의 상전압,

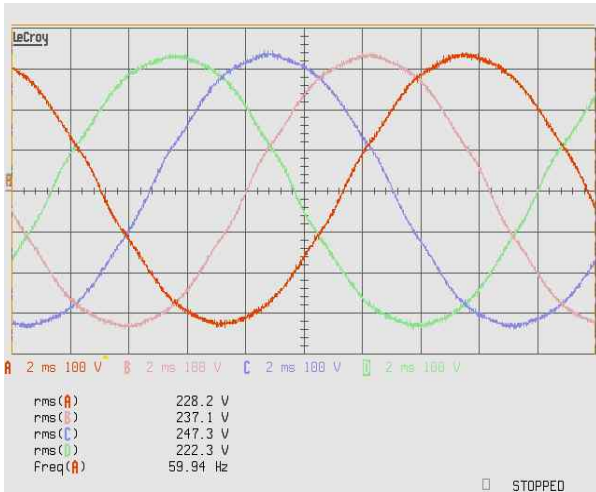


그림 15. 무부하시 60Hz에서 a, b, c, d상 발생 기전력의 상전압 파형
 Fig. 15. Phase voltage waveform of induced EMF with phase "a", "b", "c", "d", "e" on the 60Hz and no-load.

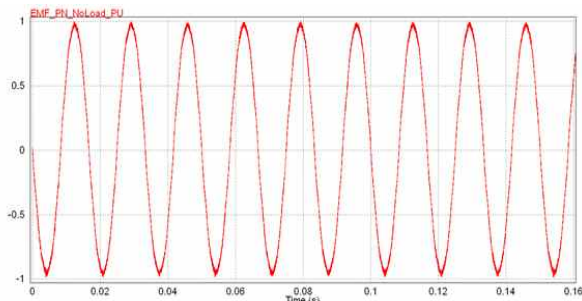


그림 16. 무부하 60Hz에서 발생하는 역기전력의 파형
 Fig. 16. Induced back-EMF waveform within 60Hz and no-load

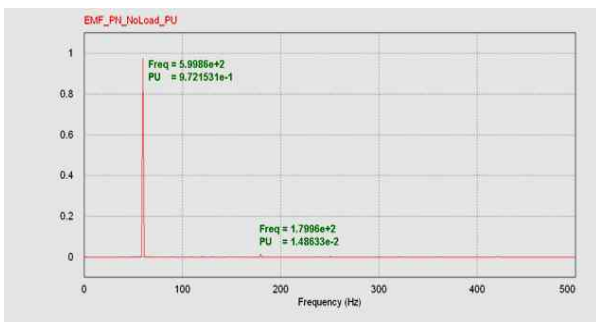


그림 17. 무부하 60Hz에서 발생하는 역기전력의 고조파 분석결과
 Fig. 17. FFT analysis result of Induced back-EMF waveform at 60Hz and no-load

ab상의 선간전압 및 bc상의 선간전압, a상의 선전류 크기를 측정된 결과이다. 그림 18에서는 60Hz의 저항 부하 100Ω에서 ab상 선간전압(적색선), bc상 선간전압(갈색선), b상의 상전압(청색선) 및 a상 선전류(녹색선)의 파형을 관측한 것이다.

표 3. 저항부하에서 주파수 변화에 따른 발생기전력
 Table 3. Induced electromotive force by variable speed of motor on resistive load

구분	5.01 Hz	10.01 Hz	29.98 Hz	50.00 Hz	60.01 Hz	65.05 Hz	비고
Vrms 및 Arms							
100 [Ω] 5상 평형 저항 부하	AB 선간	22.21	44.26	132.22	217.4	258.6	273.4
	B상	18.85	37.78	112.13	184.9	219.8	291.4
	BC 선간	22.30	44.59	132.83	220.6	263.0	241.7
	A상 전류	0.1896	0.3521	1.025	1.693	2.006	2.193

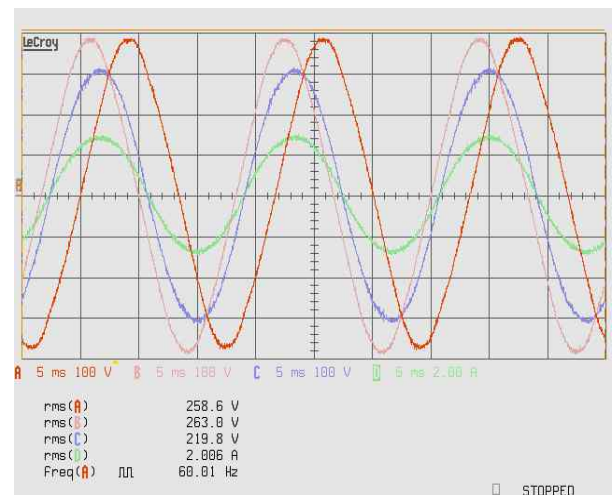


그림 18. 정격 60Hz의 5상 평형 100[Ω]에서 ab 및 bc상의 선간전압, b상 상전압 및 a상 선전류의 파형
 Fig. 18. Waveform of line to line voltage on a-b and b-c phase, phase voltage of b-phase, line current of a-phase within rated 60Hz and balanced 5-phase resistive 100[Ω] load

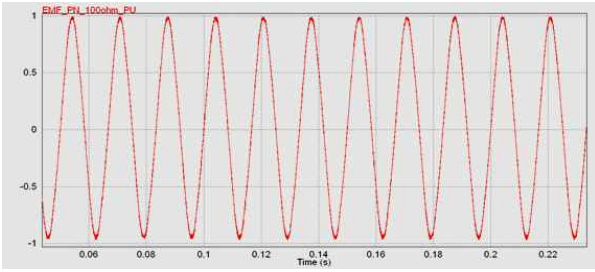


그림 19. 저항부하 100Ω 60Hz에서 발생하는 역기전력 파형
 Fig. 19. Induced back-EMF waveform within 60Hz and resistive 100Ω load

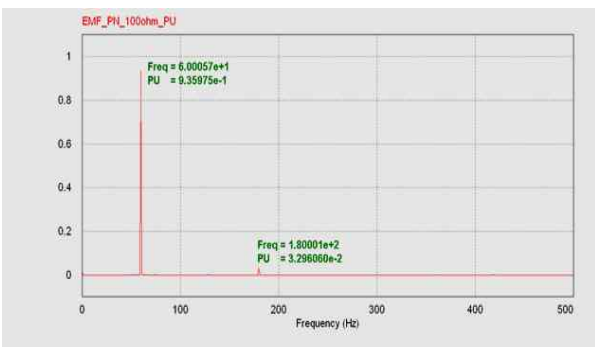


그림 20. 저항부하 100Ω 60Hz에서 발생하는 역기전력 파형의 고조파 분석
 Fig. 20. FFT analysis result of Induced back-EMF waveform at 60Hz and resistive 100Ω load

6. 개발된 발전기의 특성 검토

Maxwell 2D 전동기 설계 프로그램 활용으로 설계하여 제작 개발된 5상 5Kw SPMSG의 운전특성을 조사한 결과는 다음과 같이 요약된다.

설계 개발된 발전기의 기초자료와 특성은 표 1과 같다.

발전기에서 발생하는 유도기전력은 표 2에서 보는 바와 같이 각 상에서 무부하시 원동기(서보전동기)의 회전수를 가변 하여, 전원주파수가 5Hz에서 65Hz까지 선형적으로 변화되므로 발전기가 잘 동작함을 알 수 있다.

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

정격인 주파수 60Hz에서 평균 상전압이 233.73V이며, 평균 선간전압은 279.15V로, 상 전압과 선간전압의 진폭이 0.837배로 측정시의 조건에 따라 오차가 발생됨을 알 수 있다.

무부하 상태에서 정격 주파수인 60Hz에서 발생하는 측정된 역기전력의 파형은 그림 16과 같다. 이 역기전력의 파형을 FFT로 분석한 결과는 그림 17이다. 따라서 측정된 기본파 성분은 97.21%이며, 총 고조파 성분은 2.79%임을 알 수 있다. 이때 제3 고조파 성분은 1.49%이다.

100[Ω]의 평형 5상 저항부하 상태에서 정격 주파수인 60Hz에서 발생하는 측정된 역기전력의 파형은 그림 19와 같다. 이 역기전력의 파형을 FFT로 분석한 결과는 그림 20이다. 따라서 측정된 기본파 성분은 93.60%이며, 총 고조파 성분은 6.40%임을 알 수 있다. 이때 제3 고조파 성분은 3.30%이다.

부하특성을 관측하기 위하여 표 3에서는 저항부하 100[Ω]을 각 상에 연결하였을 때, 주파수 변화에 따른 발생 기전력의 특성으로, b상의 상전압, ab 및 bc상의 선간전압, a상의 선전류를 측정한 결과이다.

표 3에서 60Hz의 저항부하인 경우, b상 상전압은 219.8V이며, a상의 선전류가 2.006A이므로, 이때 5상 발전기의 부하는 약 2Kw가 된다. 이 부하에서 전압변동률은 $6.34 (= \frac{233.73 - 219.8}{219.8} \times 100)\%$ 이다. 이 결과는 개발된 발전기의 정격용량이 5.0Kw임을 고려하면 정격부하에서는 전압강하로 인하여 정격출력 전압이 보다 낮게 될 것이다. 이에 대한 특성 개선책으로 SPMSG를 재설계 제작하여 실험 중에 있으며 추 후 연구결과는 발표될 것이다.

그림 21은 Maxwell 2D에 의하여 설계된 자료를 사용하여 발생하는 기전력의 특성을 Simplorer 프로그램에 의하여 시뮬레이션 한 결과이며, 그림 22은 개발 제작된 SPMSG에서 주파수 변화에 따라 측정된 발생하는 유도기전력 특성을 보여주는 것이다. 이들 특성시험 결과에서 보는바와 같이 제시된 설계기법에 따라 제작된 발전기에서 얻어지는 운전특성이 시뮬레이션 결과와 아주 유사한 결과가 얻어짐을 알 수 있다.

7. 결론

일반적으로 많이 사용되고 있는 단상 및 3상 전동기보다 많은 특성을 가지는 다상 교류전동기의 운전특성을 연구 조사하기 위하여, 5상 표면부착형 영구자석 동기발전기(SPMSG)를 교류전동기 및 발전기 해석 프로그램을 사용하여 개발하였으며, 설계 제작된 5상 220V, 60Hz, 5kw 동기발전기의 개발 결과를 보여 주었다. 원동기의 회전수 가변으로 출력주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력과 파형 및 출력 전압에 포

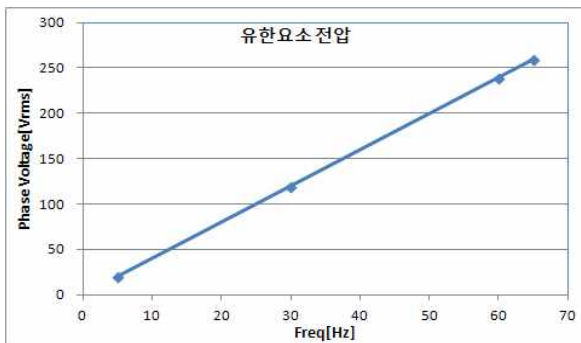


그림 21. Maxwell 2D와 Simplorer에 의하여 시뮬레이션 한 설계된 발전기의 주파수 변화에 따라 발생하는 유도기전력의 특성
Fig. 21. The characteristics of induced EMF with variable frequency by simulation using designed Maxwell 2D and Simplorer

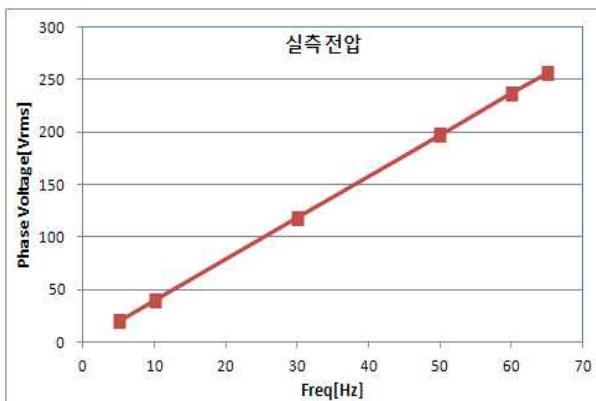


그림 22. 개발 제작된 발전기에서 주파수 변화에 따른 측정된 발생하는 유도기전력의 특성
Fig. 22. The measured characteristics of induced phase voltage with variable frequency by developed SPMSG

함된 고조파 성분 분석을 통하여 개발된 발전기의 설계 및 제작 기술의 타당성을 보여 주었다.

앞으로 개발된 5상 발전기의 전원 특성을 활용하여 소형 5상 유도전동기 및 동기전동기 개발에 있어 실제 전원공급용 장치로 사용하여 SPMSG의 특성 개선에 대한 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] 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.
- [2] 김민희, 최성운, "5상 유도전동기의 속도응답특성 개선을 위한 직접토크제어 시스템, 한국조명전기설비학회 논문지, Vol. 26, No. 01, pp.66-74, 2012. 01. 31.
- [3] 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.
- [4] 김민희, 김남훈, 백원식, "5상 유도전동기 구동을 위한 수정된 직접 토크제어 시스템(The Modified Direct Torque Control System for Five-Phase Induction motor Drives)", 한국조명전기설비학회 논문지, Vol. 23, No.02, pp.138-147, 2009. 02. 25.
- [5] 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.
- [6] 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 Ind. Appl., Vol.44, No.5, Sep./Oct.2008.
- [7] Y. Kats, "Adjustable-speed drives with multiphase motors," in Proc. IEEE Int. Electric Machines Drives Conference, pp. TC2/4.1 - TC2/4.3, May 1997.
- [8] 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.
- [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] 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.
- [11] K. N. Pavithran, R. Parimelalagan, and M. Krishnamurthy, "Studies on inverter-fed five-phase induction motor drive," IEEE Trans. Power Electron., Vol.3, No.3, pp.224-235, Apr. 1988.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] D.W. Novotny, T.A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Oxford University, Press, 1996.
- [16] H.A. Toliyat, "Analysis and Simulation of Five-Phase Variable Speed Induction Motor Drives Under Asymmetrical Connections", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 13, No. 4, pp. 748-756, July, 1998.
- [17] ANSYS, "Maxwell 2D/3D User's Guide with Simplorer and Ansoft RMxprt" ANSYS Korea, 2010.



김민회 (金琑會)

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 테네시주립대학 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 평의원.



김동희 (金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공과대학 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.

◇ 저자소개 ◇



정명우 (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. 1991.1.23~현재 신한기전 대표. 2006~현재 영남이공대학교 전기자동화과

겸임 교수.