

소형 풍력 발전용 스위치드 릴럭턴스 발전기의 설계

Design of a Switched Reluctance Generator for Small Wind Power Systems

신혜웅* · 이교범*
(Hye-Ung Shin · Kyo-Beum Lee)

Abstract - This paper deals with the design method of 1kW-Switched Reluctance Generator (SRG) for wind power applications. The coefficient of the output equation is determined according to the purpose specification for design of SRG. Detailed design is carried out, after selecting the outer diameter of the rotor on the basis of the output equation. The generation characteristic of designed generator is verified by using Finite Element Method (FEM).

Key Words : Switched reluctance generator, Wind power generation, FEM

1. 서론

기존의 화석연료를 대체하는 미래 에너지로 각광받고 있는 신재생 에너지 중, 풍력 에너지를 활용하기 위한 풍력발전 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-2]. 최근 대도시를 중심으로 증가하고 있는 초고층 건물에 적용하기 위한 단독 발전 또는 배터리 시스템용 소·중 용량(20kW정도) 풍력 발전기의 수요가 증가하고 있다. 일반 건물에 비하여 에너지 소비량과 온실가스 배출량이 많다는 문제점이 있는 초고층 건물의 경우, 고밀도의 풍력에너지를 활용할 수 있기 때문에 선진국을 중심으로 소형 풍력 발전 시스템을 적용하려는 연구가 꾸준히 진행되고 있다[3]. 또한 소형 풍력 발전 시스템은 전력 계통으로부터 분리된 외딴 섬과 산촌에서 그 필요성 또한 부각되고 있으며 이를 활용하기 위한 시도가 진행되고 있다[4].

풍력 발전 시스템에서 기계 에너지를 전기 에너지로 변환해주는 발전기는 대부분 1MW 이상의 대용량이며, 이중여자 권선형 유도 발전기와 영구자석형 발전기가 주로 사용되고 있다[5]. 유도 발전기는 효율이 비교적 낮으며, 영구자석형 발전기는 회전자 구성하는 희토류의 종류에 따라서 그 성능과 가격이 결정된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 희토류가 사용되지 않고 회전자의 형상으로 발생하는 토크를 활용하는 스위치드 릴럭턴스 발전기가 연구되고 있다[6].

스위치드 릴럭턴스 발전기는 최근 전력용 반도체를 이용한 드

라이브의 응용성이 커졌고, 높은 효율성, 빠른 응답성, 낮은 회전자 손실, 내열성, 견고성, 낮은 제작비 등의 장점들을 지닌다. 또한 전력변환시스템에 사용되는 소자수가 적고, 넓은 범위의 가변속 운전이 가능한 장점이 있어서 많은 연구가 진행되고 있다[7-8]. 특히 4상 스위치드 릴럭턴스 발전기는 토크리플을 감소시킬 수 있고, 어떤 회전자 위치에서도 충분한 기동 토크, 넓은 운전영역, 그리고 소음을 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 1kW급 소형 풍력 발전 시스템을 위한 4상 스위치드 릴럭턴스 발전기의 설계에 대하여 다룬다. 스위치드 릴럭턴스 발전기의 회전자 외경과 적층 길이는 출력계수와 D^2L 법을 이용하여 결정한다. 적층 길이, 고정자 외경, 그리고 극호길이에 따라 슬롯 면적을 결정하여 고정자 코일의 직경 및 턴 수를 선정한다. 정격 부하에서 1kW를 출력하기 위해서 정격속도에서 여자 전류를 인가했을 때 회전자와 고정자 코어가 포화되지 않도록 설계를 수행한다. 이러한 과정을 거쳐 설계한 스위치드 릴럭턴스 발전기는 유한요소 해석법을 이용하여 그 특성을 해석하고, 이를 통해 실험결과와 비교하여 설계한 스위치드 릴럭턴스 발전기의 타당성을 검증한다.

2. 스위치드 릴럭턴스 발전기의 설계

2.1 설계 목표사항 및 절차

표 1은 1kW급 8/6 4상 스위치드 릴럭턴스 발전기의 설계 목표사항을 나타낸다.

전기적 출력이 1kW를 만족하도록 정격 토크와 정격 속도가 결정되고, 정격 전압까지 인가되었을 때 10Nm의 토크가 출력될 것이다. 그림 1은 스위치드 릴럭턴스 발전기를 목표 사양에 만족하도록 설계하기 위한 설계 순서를 나타낸다. 그림 1의 절차에 따라 설계하기 위해 먼저 스위치드 릴럭턴스 발전기의 출력 방정식이 고려된다. 식 (1)은 출력 방정식을 나타낸다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea E-mail : kyl@ajou.ac.kr

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.

Received : October 08, 2014; Accepted : February 27, 2015

표 1 설계 목표사항

Table 1 Design specification

항목	값	단위
정격 전압	80	V
정격 전류	13	A
정격 토크	10	Nm
정격 속도	1000	rpm
정격 출력	1000	W
극수	8/6	-
상	4	-

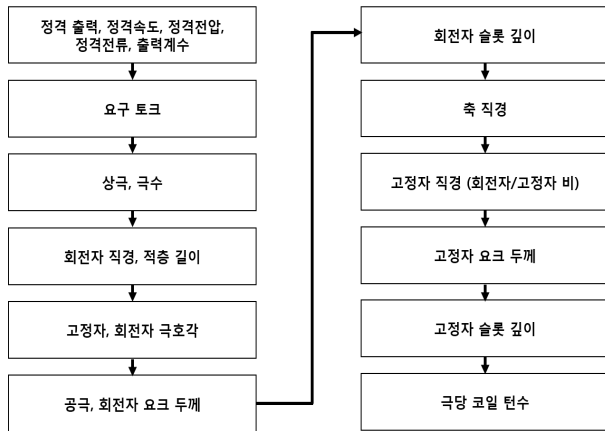


그림 1 스위치 릴럭턴스 발전기의 설계순서

Fig. 1 Design process of switched reluctance generator

$$T = kD_r^2 \cdot L_{stk} \quad (1)$$

여기서 T 는 토크, k 는 출력계수, D_r 은 회전자 직경, L_{stk} 는 회전자 적층 길이를 나타낸다. 전기적 출력에 따라 결정되는 출력 계수는 보통 경험적인 값으로 정해지며, 소형 전동기이므로 1.3을 설정하였다. 먼저 정격 출력을 고려하여 속도와 토크 값이 계산되고, 회전자/고정자의 비에 따라 회전자 직경이 선정된다.

공극은 회전자 외경과 적층길이로부터 결정되며, 작으면 작을 수록 누설자속이 적어 성능이 우수해지지만, 제작 시 작은 공극을 일정하게 유지하는 것이 어려운 작업이므로 너무 작은 공극은 선정될 수 없다. 따라서 공극은 회전자 외경과 적층길이를 고려하여 0.2 mm로 선정하였다. 또한 고정자 직경과 극에 따라 경험적으로 고정자의 극호각이 결정된다. 결정된 극호각에 따라 고정자와 회전자 극호길이는 식 (2)와 (3)처럼 결정된다.

$$t_s = 2\pi(r_1 + g) \cdot \frac{\beta_s}{360^\circ} \quad (2)$$

$$t_r = 2\pi(r_1) \cdot \frac{\beta_r}{360^\circ} \quad (3)$$

여기서 t_s , t_r 은 고정자, 회전자의 극호길이, β_s , β_r 은 고정자, 회전자의 극호각, r_1 은 회전자 반경, g 는 공극이다. 회전자, 고정자

의 요크두께는 철심의 포화 없이 최대의 회전자 자속이 흐를 수 있도록 설계해야하기 때문에, 고정자의 요크 두께는 $t_s/2$ 이상이 되어야하며, 실용상 고정자의 극호길이에 1.1배정도가 된다. 회전자의 요크 두께도 $t_r/2$ 이상으로 결정되며, 실용상 회전자의 극호길이에 0.7배정도로 고려하여 계산한다[9].

식 (4)는 축 직경을 구하기 위한 수식을 나타낸다.

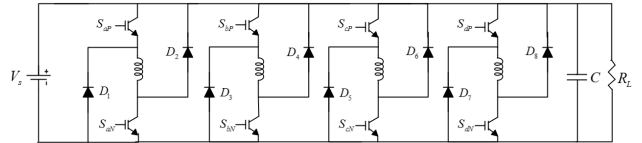


그림 2 비대칭 브릿지 컨버터

Fig. 2 Asymmetric bridge converter

$$D_{sh} = D_r - 2(d_r + y_r) \quad (4)$$

여기서 D_{sh} 는 축 직경, D_r 은 회전자 직경, d_r 은 회전자 슬롯깊이, y_r 은 회전자 요크 두께이다. 축 직경은 회전자 요크와 회전자 슬롯깊이에 따라 구할 수 있다.

4상 스위치 릴럭턴스 발전기의 권선 수는 식 (5)에 의해 결정되며, 권선은 집중권을 사용한다. 기본 식에 의해 턴수가 정해지고, 선경은 고정자 슬롯의 면적과 전류밀도를 고려하여 정해지며, 턴수는 슬롯에 최대한 감길 수 있도록 선정한다.

식 (5)는 기본 턴수를 결정하기 위한 수식을 나타낸다.

$$N_p = 30 \frac{V_s}{rpm \cdot m \cdot t_s \cdot L_{stk} \cdot N_r \cdot B_s} \quad (5)$$

여기서 m 은 상수, N_r 은 회전자 극수, V_s 는 정격전압, rpm 은 정격속도, B_s 는 자속 밀도이다. 기본 설계는 위에서 설명한 절차를 거쳐 수행하며, 설계결과는 유한요소 해석법을 이용하여 설계 목표사항에 맞는 특성이 도출되는지 확인한다.

2.2 구동회로

그림 2는 설계한 4상 스위치 릴럭턴스 발전기의 동특성 해석 수행을 위한 비대칭 브릿지 컨버터를 나타낸다. 설계 결과는 유한요소 해석법을 이용해 정격속도에서 발전특성을 확인하고, 상전류와 토크는 정격 부하에서 DC 전압을 인가 후 확인한다.

식 (6)과 (7)은 한상의 전압 방정식을 나타낸다. 전압방정식의 역기전력은 정격 출력 전압을 형성하는데 있어서 매우 중요한 변수이다.

$$v = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (6)$$

$$v = \omega L \frac{di}{d\theta} + \omega i \frac{dL}{d\theta} + Ri \quad (7)$$

여기서 v 는 DC전압, ω 는 속도, L 은 인덕턴스, R 은 권선 저항을

나타낸다. 전압 방정식에서 역기전력 부분은 식 (8)에 해당한다.

$$e_{back} = \omega L \frac{di}{d\theta} + \omega i \frac{dL}{d\theta} \quad (8)$$

각 회전자 위치에 따라 역기전력은 전류, 인덕턴스, 속도의 곱으로 형성된다.

스위치드 릴럭턴스 발전기를 구동하기 위한 비대칭 브릿지 컨버터는 다양한 스위칭 방법이 존재한다. 그림 3은 하드쇼핑 스위칭 방법에 따라 설계한 스위치드 릴럭턴스 발전기 한 상의 초기 여자 전류 특성을 나타낸다. 그림 3(a)는 스위치 S_{aP} 와 S_{aN} 을 동

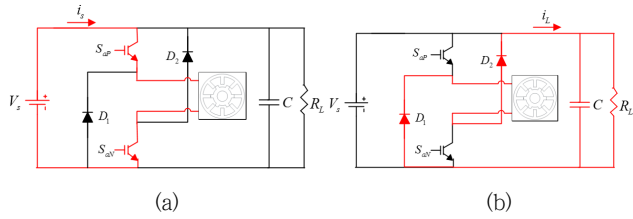


그림 3 하드쇼핑 스위칭 방법 (a) S_{aP} , S_{aN} on (b) S_{aP} , S_{aN} off
Fig. 3 Hard chopping switching method (a) S_{aP} , S_{aN} on (b) S_{aP} , S_{aN} off

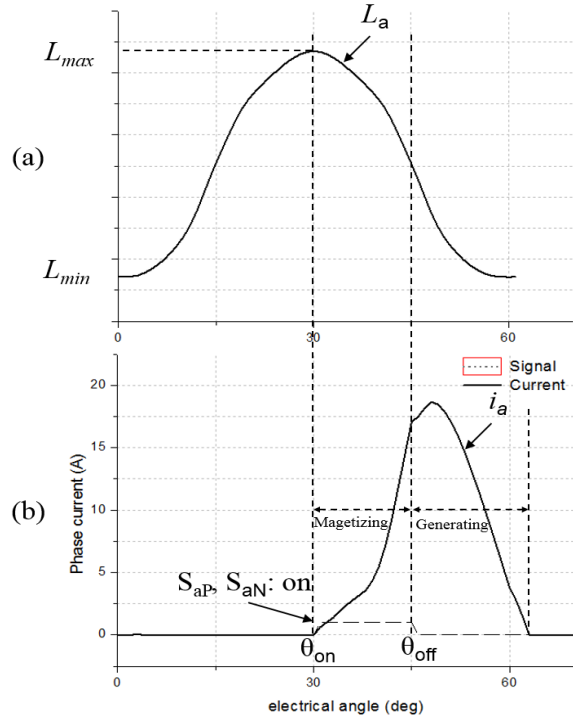


그림 4 인덕턴스에 따른 상전류 특성 (a)인덕턴스 (b)상전류
Fig. 4 Phase current in accordance with inductance (a)inductance (b)phase current

시에 턴-온 시켰을 때 전류가 한 상에 여자되는 것을 나타낸다. 그림 3(b)는 스위치 S_{aP} 와 S_{aN} 을 동시에 턴-오프 시켰을 때 발전

된 전류가 부하로 흐르는 것을 나타낸다.

그림 4는 하드쇼핑 스위칭 방법을 이용한 인덕턴스에 따른 상전류 특성을 나타낸다. 그림 4(a)는 A상의 인덕턴스 형태를 나타내며, 인덕턴스 최대 부분인 30.5° 인 θ_{on} 위치에서 스위치를 턴-온시키고 전류를 인가하여 자속을 만든다. 그 후에 45° 인 θ_{off} 위치에서 스위치를 턴-오프시켜, 생성된 자속과 역기전력이 더해져 최대 발전 전류가 생성되도록 하였고, 이로 인해 정격 전압이 형성되는 것을 확인하였다.

3. 유한요소해석법을 이용한 특성 해석

3.1 설계한 스위치드 릴럭턴스 발전기의 검증

제안한 스위치드 릴럭턴스 발전기가 원하는 목표사양에 만족하는 결과를 얻었는지 확인하기 위해, 특성 해석 및 검증은 유한요소 해석법을 이용하여 수행한다. 그림 5는 설계한 스위치드 릴럭턴스 발전기의 형상과 설계 시 주요 파라미터를 나타낸다. 표 2는 설계순서에 따라 발전기 설계 치수를 나타낸다.

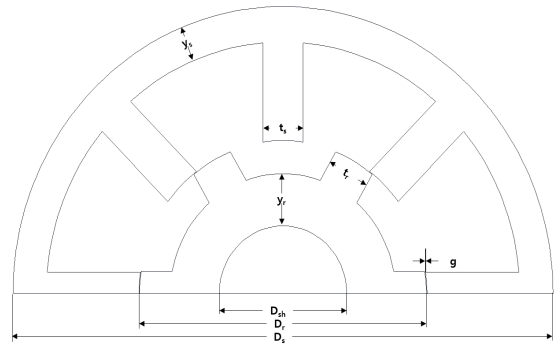


그림 5 설계한 SRG의 형상 및 주요 파라미터

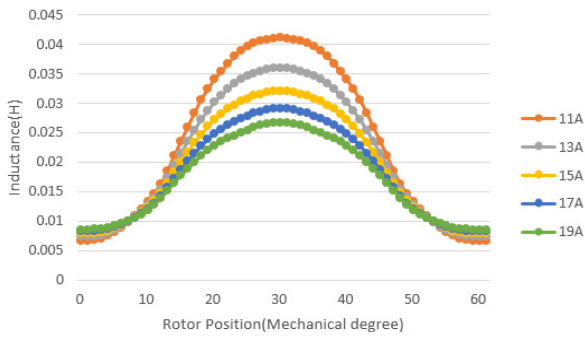
Fig. 5 Shape and parameter of designed SRG

표 2 설계한 SRG 설계치수

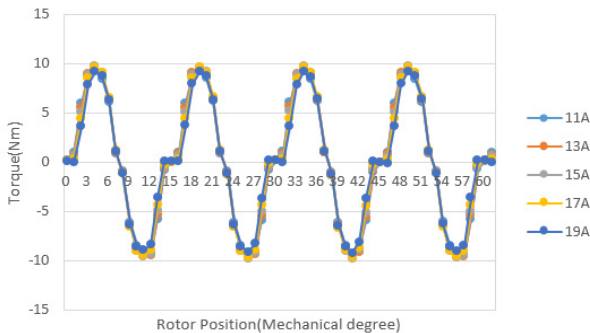
Table 2 Designed SRG parameter

항목		값	단위
고정자	외경	D_s	161 mm
	극수	N_s	8 -
	극호각	β_s	16 °
	극호길이	t_s	12 mm
	요크두께	y_s	10 mm
회전자	외경	D_r	85 mm
	극수	N_r	6 -
	극호각	β_r	17 °
	극호길이	t_r	12.6 mm
	요크두께	β_r	9 mm
공극 길이		g	0.2 mm
축 직경		D_{sh}	37.3 mm
적층 길이		L_{stk}	100 mm

그림 6은 정특성 해석을 수행했을 시 인덕턴스와 토크 프로파



(a)



(b)

그림 6 전류에 따른 특성 (a)인덕턴스 프로파일 (b)토크 프로파일
Fig. 6 Characteristic in accordance with current
(a) inductance profile (b) torque profile

일을 나타낸다. 정특성 해석은 회전자를 일정하게 1000rpm으로 회전시키고, 일정한 전류를 인가하여 발전기의 특성 해석을 수행하는 것이다. 그림 6(a)의 인덕턴스는 한 상에 전류를 11A~19A 까지 인가했을 때의 형상을 나타낸다. 그림 6(b)는 한 상에 전류를 11A~19A까지 인가했을 때의 토크 형상을 나타낸다. 인덕턴스는 낮은 전류가 인가될수록 인덕턴스 기울기가 크게 형성되고, 토크는 높은 전류가 인가될수록 큰 토크가 발생된다. 전류 및 토크의 크기는 이러한 상관관계를 고려하여 목표사양에 맞게 설계한다. 각 전류에 따른 토크의 크기는 0.2Nm의 차이를 보이고 있

다. 제안한 스위치드 릴럭턴스 발전기의 정격 전류는 13A이며, 이때에 인덕턴스는 35.94mH이고, 토크는 9.56Nm로 확인되었다. 따라서 정특성 해석 결과로 기계적 입력은 1000.61W가 되므로, 설계한 스위치드 릴럭턴스 발전기의 정격출력은 1kW가 될 것으로 예상된다.

그림 7은 정특성 해석 시 철심의 자속밀도 선과 자속밀도를 나타낸다. 그림 7(a)는 철심의 포화를 확인하기 위한 고정자 요크의 빨간 선 부분을 나타낸다. 그림 7(b)는 빨간 선 부분을 지나 자속밀도를 확인한 결과이다. 이 결과 자속 밀도가 최대 1.2T로 나타났으며, 스위치드 릴럭턴스 발전기는 자속이 포화되지 않는 범위에서 안정적으로 동작한다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 동특성 해석 시 정격부하에서의 출력 전압특성 및 출력 전류 특성을 나타낸다. 동특성 해석은 스위치의 턴-온, 턴-오프 각을 설정하고, 정격 속도에서 확인한다. 이때에 DC 전원 공급기를 사용한다는 조건하에 35V의 여자전압이 인가되어 출력 전압이 형성된다. 여자전압은 출력 목표인 최대 전력을 얻기 위해 설정 되었다[7]. 출력 전압은 목표사양의 정격 전압인 79.62Vrms까지 캐패시터로 충전되는 것을 확인했다.

그림 9는 동특성 해석 시 정격부하에서의 출력 전력을 나타낸다. 출력 전압과 마찬가지로 출력 전력은 1062.5W가 나타나는 것을 확인할 수 있고, 이러한 특성은 스위치드 릴럭턴스 발전기

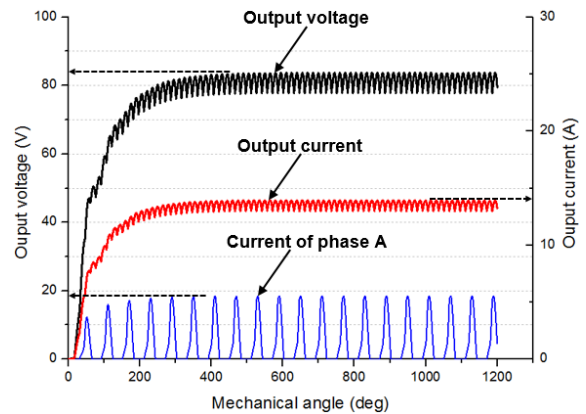


그림 8 출력 전류 및 출력 전압
Fig. 8 Output current and output voltage

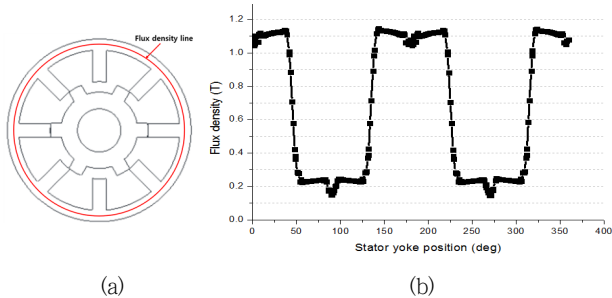


그림 7 잔류 자속 밀도 (a)자속 밀도 라인 (b)고정자 자속 밀도
Fig. 7 Residual magnetic flux density (a) magnetic flux density line (b) magnetic flux density of stator yoke

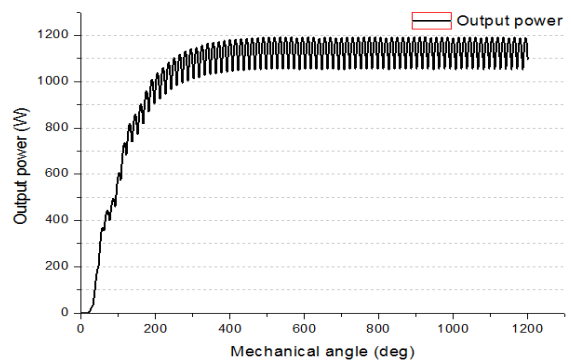


그림 9 출력 전력
Fig. 9 Output power

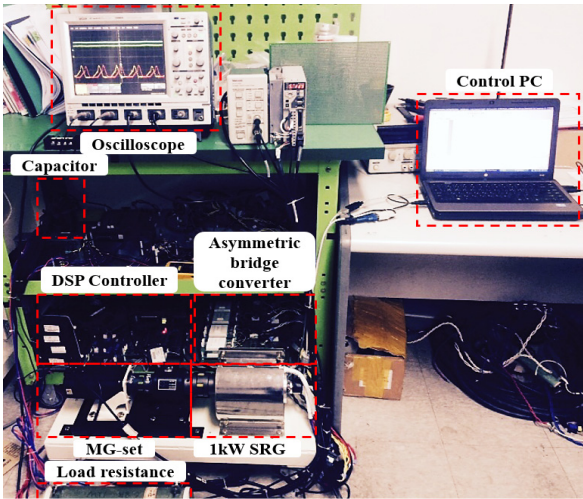


그림 10 1kW SRG 실험 세트
 Fig. 10 Experiment set of 1kW SRG

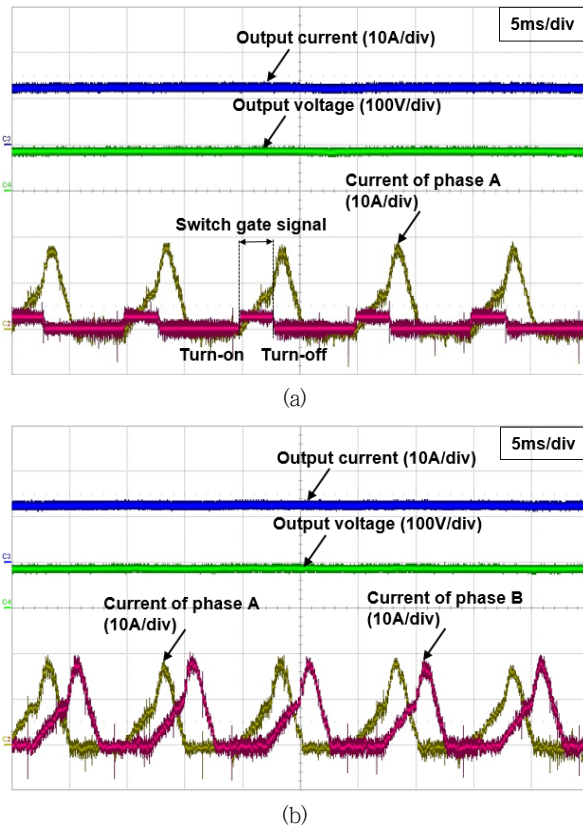


그림 11 SRG 실험 결과 (a) 스위치 각을 포함한 발전특성 (b) A, B상을 포함한 발전특성
 Fig. 11 SRG experiment result (a) generation characteristic with switch angle (b) generation characteristic with phase A and B

가 제대로 설계되었음을 판단하게 한다.

4. 실험 결과

4.1 제작한 스위치드 릴렉턴스 발전기의 검증

그림 10은 시뮬레이션 결과를 확인하기 위한 1kW급 SRG 실험 세트를 나타낸다. 실험 세트는 시뮬레이션 조건과 동일하게 구성되었다. MG-set를 이용해 PM모터를 1000rpm으로 회전시키고, SRG에 35V전원을 스위치 턴-온각 30.5°와 턴-오프각 45°를 설정 후 인가한다.

그림 11은 실제 정격에서 SRG의 발전특성을 나타낸다. 그림 11(a)는 A상의 턴-온각과 턴-오프각에 따른 상전류 특성을 나타낸다.

그림 11(b)는 A상과 B상의 상전류 특성을 나타낸다. 상에 인가되는 전류와 발전되는 전류에 따라서 출력 전압 80.4V와 출력 전류 12.8A가 나타나는 것을 확인하였다. 실험 결과 시뮬레이션과 SRG 특성이 유사하게 나타나는 것을 확인 하였다.

표 3은 유한요소 해석법을 이용한 동특성 해석 결과와 실험결과와의 비교를 나타낸다. 전기적 입력과 기계적 입력은 정격용량인 1kW에 맞는 6.15Ω과 여자전압 35V를 설정하여 확인하였다. 총 입력에 따라 발전되는 출력을 확인하였을 때, 발전기가 1kW로 동작하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 효율은 81.98%로 나타났고, 실험을 수행했을 때의 효율은 81%로 유사한 결과가 나타나, 4상 1kW급 스위치드 릴렉턴스 발전기가 목표사양에 만족하도록 설계되었다.

표 3 유한요소해석법을 수행 결과
 Table 3 Performance result of FEM

항목	시뮬레이션	실험	단위
기계적 입력 전력	1039.34	1014.6	W
전기적 입력 전력	256.55	251.3	W
정격 출력 전력	1062.5	1029.12	W
정격 전류(rms)	12.95	12.8	A
정격 전압(rms)	79.62	80.4	V
효율	81.98	81.29	%

5. 결 론

본 논문은 풍력 발전용 1kW급 4상 소형 스위치드 릴렉턴스 발전기의 설계를 제안하였다. 출력 방정식은 D²L법을 적용하여 계산되었으며, 자세한 치수는 회전자의 외경이 결정된 뒤 설계되었다. 설계된 스위치드 릴렉턴스 발전기의 정특성 및 동특성 해석은 유한요소 해석법을 이용하여 수행되었으며, 설계한 스위치드 릴렉턴스 발전기의 타당성은 실험을 통해 확인하여 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (No. 2013R1A1A2A10006090)

References

- [1] H. G. Jeong and K. B. Lee, "Power Electronics Technique in Wind Power Systems," Hantee Media, 2014.
- [2] I. J. Kim and J. Y. Choi, "Design and Analysis of Direct-Coupled, Small-Scaled Permanent Magnet Generator for Wind Power Application," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 28, No. 5 pp. 39~51, 2014.
- [3] Y. H. Park, J. H. Park, J. C. Park, and E. K. Rhee, "A Study on the Application of Small Wind Turbine System in Super High-rise Building," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 4, pp.187-193, 2013.
- [4] J. Chen, C. V. Nayar, and L. Xu, "Design and Finite-Element Analysis of an Outer-Rotor Permanent-Magnet Generator for Directly Coupled Wind Turbines," IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 36, No. 5, pp.3802-3809, Sept. 2000.
- [5] N. Yamamura, M. Ishida, and T. Hori, "A Simple Wind Power Generating System with Permanent Magnet Type Synchronous Generator," IEEE PEDS'99, pp. 849-854, Jul. 1999.
- [6] M. A. Mueller, "Design of low speed switched reluctance machines for wind energy converters," In Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives. pp. 60-64, 1999.
- [7] V. Nasirian, S. Kaboli, and A. Davoudi, "Output Power Maximization and Optimal Symmetric Freewheeling Excitation for Switched Reluctance Generators," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 3, May/June 2013.
- [8] R. Cardenas, R. Pena, M. Perez, J. Clare, G. Asher, and P. Wheeler, "Control of a Switched Reluctance Generator for Variable-Speed Wind Energy Applications," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, Dec. 2005.
- [9] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, 2001.

저 자 소 개



신혜웅(Hye-Ung Shin)

2012년 군산대 전자정보공학부 졸업. 2014년 한양대 전자시스템공학과 졸업(석사). 현재 아주대 전자공학과 박사 과정.
E-mail : hyeung123@naver.com



이교범(Kyo-Beum Lee)

1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학). 2003년~2006년, Aalborg 대학교 에너지기술학과(덴마크). 2006년~2007년 전북대 전기공학과 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 교수.
E-mail : kyl@ajou.ac.kr