

영구자석형 풍력용 발전기의 설계 및 전력 변환

장석명*, 최장영*, 조한욱*, 윤기갑**, 김병한**, 경남호***

*충남대학교, **한국 전력연구원, ***한국 에너지 기술연구원

Power Conversion and Design of Permanent Magnet Generator for Wind Power Applications

Seok-Myeong Jang*, Jang-Young Choi*, Han-Wook Cho*, Ki-Kab Yoon**, Byeong-Han Kim**, Nam-Ho Kyung***
Sang-Sub Jeong*

Abstract - This paper deals with the power conversion and design of permanent magnet generator for wind power applications. This paper derives analytical solutions for open-circuit field, armature reaction field, torque, back-emf, inductance and resistance of permanent magnet generators for wind power applications. And then, by presenting the variation of torque according to design parameters and by applying restrict conditions to it, we determine proper design parameter appropriate to rated power and speed. Finally, this paper also presents power conversion system reasonable in wind power applications.

1. 서 론

천연 에너지를 이용하는 발전 시스템으로 여러 가지가 있으나 풍력 발전이 현재 많이 응용되고 있는 추세이며 앞으로 무궁무진한 발전가능성을 가진 자원이다. 그러나, 대부분의 풍력 발전 시스템은 현재 1MW이상의 대용량 발전을 하는 거대한 시스템으로 이루어져 있다. 따라서, 대부분의 경우에 이와 같은 대용량 풍력발전을 위한 시작기로는 작은 용량 즉 2kw-100kw 출력을 갖는 소용량 발전 시스템이 적당하다 [1].

따라서 본 논문은 소용량 500W, 900rpm 급 영구자석형 발전기의 설계에 대하여 다루고자 한다. 우선, 영구자석형 풍력용 발전기에 적합한 자화패턴이 어떤 것인지를 알아보기 위하여 공간고조파법을 이용하여 각 자화에 대해 자계 분포, 역기전력, 토크 및 인더턴스 특성식을 도출하고, 설계변수에 따른 토크 특성으로부터 최적의 설계변수를 도출한다. 도출된 설계변수에 제약조건을 대입하여 각각의 자화 패턴에 따른 발전기의 외형적 첫수를 결정하고 이로부터 턴 수를 산정한다. 그 다음 전류값을 가변 시켜가며 정격에 부합하는 전류 즉 정격전류를 산정하는 것으로 설계를 종료하고, 설계된 발전기가 각각 정격에 부합되는지를 유도요소 해석을 통하여 검증한다. 한편 소용량 풍력 발전시스템의 전력 변환을 위하여 소용량에 적합한 전력 변환장치를 제시하고 발전된 전압이 전력 변환되는 일련의 과정을 시뮬레이션을 통하여 확인하고자 한다.

2. 해석 모델 및 가정

그림 1(a)는 풍력용 영구자석형 발전기의 무부하시자계 분포 및 전기자 반작용 자계분포 예측을 위한 해석모델을 보여준다. 여기서 고정자 철심 및 영구자석 영역의 투자율은 각각 무한 및 1이라 가정한다. 또한, 고정자 권선은 면전류 밀도로 가정하여 $r=R_s$ 에 분포한다고 가정한다. 그림 1(b)는 회전자에 사용되는 영구자석의 자화 패턴에 따른 종류를 보여준다.

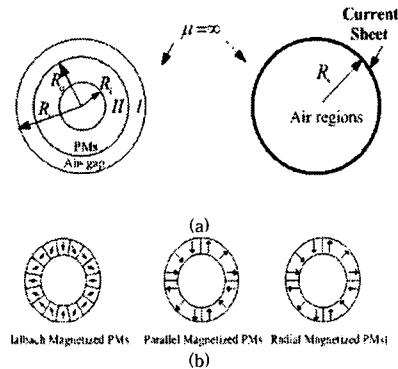


그림 1. 해석 모델 및 자화 패턴: (a) 무부하시 및 전기자 반작용 자계 예측을 위한 해석 모델 및 (b) 자화 패턴.

3. 특성 해석 식 도출

3.1 무부하시 자계분포 특성식

영구자석 영역에는 전류가 없으므로, $\nabla \times H = 0$. 따라서 $B = \mu_0 \nabla \times M$. 자기벡터자위 A 는 $\nabla \times A = B$ 로 정의된다. 회전기의 기하학적인 구조에 의해, 자기 벡터자위는 오직 z (축)방향 성분만을 갖는다. 쿠лон 게이지 $\nabla \cdot A = 0$ 를 적용한 뿐아송 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{d^2}{dr^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} A_{zn} - \frac{q^2}{r^2} = -\frac{q \mu_0}{r} M_n \quad (1)$$

여기서 A_{zn} 은 자기벡터자위의 z 방향 성분이고, $q = np$ 로 n 은 고조파차수와 p 는 극쌍수이다. Halbach 자화 및 평행방향 자화는 반경방향 및 원주방향 자화 성분을 갖기 때문에 $M_n = M_{rn} + M_{th}/q$ 이지만, 반경방향 성분은 원주방향 성분을 갖지 않으므로 $M_n = M_{rn}$ 이 된다. 식 (1)의 일반해를 구한 후 벡터자위의 정의에 대입하여 영구자석 영역 및 공극 영역에서의 자계 특성식을 얻게 되는데, 그 자계특성식의 미정계수는 각각의 영구자석 자화 패턴에 따른 경계조건을 대입하여 구할 수 있다.

3.2 전기자 반작용 자계분포 특성식

우선 A 상에 대해 푸리에 전개를 하면 A 상에 의한 전류밀도 분포는 식 (2)로 주어진다.

$$J_a = \sum_{n=1, odd}^{\infty} I_n i_a \cos(q\theta) \quad (2)$$

여기서 i_a 는 A 상 전류의 최대값이고 I_n 은 전류분포에 대한 푸리에 계수이다. 3상 권선의 경우 각 상은 $2\pi/3$ 의 위상차가 나므로 B 상과 C 상의 전류 분포는 식 (3)으로 주어진다.

$$J_b = \sum_{n=1, odd}^{\infty} I_n i_b \cos q(\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.1)$$

$$J_c = \sum_{n=1, odd}^{\infty} I_n i_c \cos q(\theta - \frac{4\pi}{3}) \quad (3.2)$$

코일에 의한 자계를 구할 때, 영구자석영역의 비 투자율을 1이라하고, 코일영역을 면 전류밀도라 했기 때문에 지배방정식은 라플라스 방정식 형태로 주어지고 면 전류밀도는 경계 조건에서 고려된다. 극 좌표계의 라플라스 방정식은 식 (4)로 주어진다.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_n + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_n + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} A_n = 0 \quad (4)$$

무부하시 자계분포 특성식 유도와 마찬가지로 식 (4)의 일반해를 벡터자위의 정의에 대입하여 특성식을 구한 뒤 경계조건을 대입하여 식 (5)로 주어지는 A 상에 의한 전기자 반작용 자계특성식을 얻는다.

$$B_{ra} = - \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{\mu_0 I_n}{(R_i^{(-2n)} R_s^{(q-1)} - R_s^{(-q-1)})} \cdot [R_i^{-2n} r^{q-1} + r^{-(q+1)}] \sin(q\theta) \quad (5)$$

결과적으로 3상전원에 의한 자속밀도는 식 (6)으로 정리된다.

$$B_{winding} = - \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{\mu_0 I_n [R_i^{-2n} r^{q-1} + r^{-(q+1)}]}{(R_i^{(-2n)} R_s^{(q-1)} - R_s^{(-q-1)})} \cdot [i_a \sin(q\theta) + i_b \sin(q(\theta - 2\pi/3)) + i_c \sin(q(\theta - 4\pi/3))] \quad (6)$$

3.3 역기전력 특성식

영구자석회전자에 의한 자속밀도가 고정자 권선에 쇄교하는 자속은 식 (7)로 주어진다.

$$\Psi = \int_{-a_y/2}^{a_y/2} B_{mag}(a, t) R_s l_a da \quad (7)$$

여기서 a_y 및 l_a 는 코일 피치 각 및 발전기의 축 방향 유효 길이를 나타낸다. 따라서 식 (7)에 의해 계산된 쇄교자속 및 $e = -Nd\Psi/dt$ 를 이용하여 한상에 의한 역기전력은 식 (8)과 같이 유도된다.

$$V_{emf} = 2pNr K_{dm} l_a B_s \omega \cos(\alpha_y/2 - \alpha_{mv}) \quad (8)$$

여기서 N 및 B_s 은 각각 상당 턴 수와 반경 방향 자속밀도 특성식에서 $\cos(q\theta)$ 를 제외한 n 차의 고조파 차수에 대한 식을 나타내며, ω 는 회전속도를 나타낸다.

3.4 인덕턴스 및 저항 특성식

고정자권선에 의한 상당 쇄교자속은 영구자석에 의한 쇄교자속과 같은 방식으로 식(9)처럼 표현가능하다.

$$\Psi = \int_{-a_y/2}^{a_y/2} B_{winding}(a) R_s l_a da \quad (9)$$

한편, $\Psi = L_i a$ 임으로 A상의 자기 인덕턴스는 식 (10)로 표현된다.

$$L_s = 2R_s G_n l_a (\cos(qa_y/2) - 1)/q \quad (10)$$

여기서 G_n 은 식 (5)에서 $\sin(q\theta)$ 를 제외한 나머지 항을 나타낸다. 상호 인덕턴스를 고려하고 end winding 인덕턴스를 무시하면, 상 인덕턴스 즉 동기인덕턴스는 식 (11)로 정리된다.

$$L_{sync} = 3L_s/2 \quad (11)$$

功力용 발전기의 경우 비교적 저속 운전을 하므로 AC 저항은 DC저항과 같다고 가정하여도 그 오차는 없을 것으로 사료된다. 따라서 영구자석형功力용 발전기의 상당저항은 식 (12)로 계산된다.

$$R = 4\rho_c N l_{ic} / \pi d_c^2 \quad (12)$$

여기서 ρ_c , d_c , N 및 l_{ic} 는 각각 코일의 저항율, 반경, 턴 수 및 길이를 나타낸다.

3.5 토크 특성식

3.1절과 3.2 절로부터 이미 고정자권선의 전류밀도와 영구자석에 의한 자속밀도에 대한 특성식을 도출하였기 때문에 토크는 $T = r \times F$ 로 구할 수 있으며 여기서 F 는 로렌츠력에 의해 식 (13)과 같다.

$$F = \int_v J \times B dv \quad (13)$$

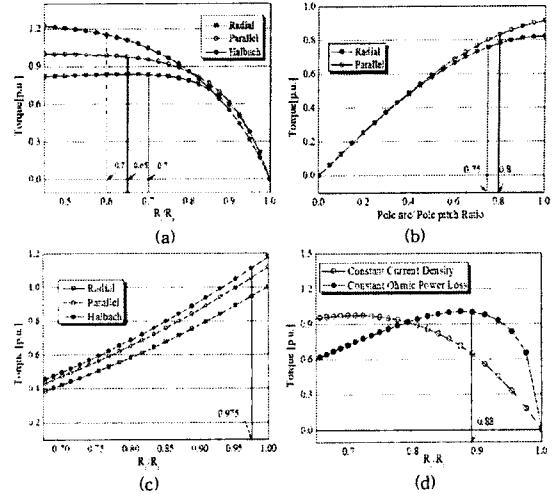


그림 2. 설계변수에 따른 토크 특성 해석: (a) 영구자석 두께, (b) 극호비, (c) 공극길이 및 (d) 권선 두께.

4. 설계변수에 따른 토크 특성 해석

功力 발전기의 요구 정격은 터빈 로터의 정격에 의해 정해진다. 이미 제작 되어진 터빈 로터의 정격은 330W 및 900rpm 이므로 발전기의 정격은 터빈로터의 power의 150%에 해당하는 500W로 하기로 한다. 한편, 설계하려는 발전기가 영구자석형 동기 발전기이므로 회전속도 $n = 120f/p$ 로부터 결정되어지므로 발전 전압의 주파수를 60Hz라 한 경우 900rpm이 나오기 위하여서는 $p = 7200/900 = 8$ 에 의해 발전기의극수는 8극으로 결정되어진다. 따라서 본 절에서는 8극을 기준으로 각각의 자화 패턴에 대하여 설계변수에 따른 토크 특성을 해석하고자 한다. 그림 2는 다양한 영구자석 자화 패턴(Halbach 자화, parallel 자화 및 radial 자화)을 갖는 8극 회전전자에 대한 설계변수에 따른 즉 영구자석 두께, 극호비, 공극길이 및 권선 두께에 따른 토크 특성 곡선을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 임의의 설계변수에 대하여 각 자화 패턴에 따라 적절한 혹은 최적의 설계변수의 비가 존재함이 보인다. 따라서 그림 2의 결과로부터 각 자화 패턴에 따른 설계변수의 비를 표 1과 같이 얻을 수 있으며, 표 1에 제약조건을 대입하여 표2에 보이는 최종적인 발전기의 치수 변수를 얻을 수 있다. 한편, 제약조건으로 영구자석형 발전기의 외직경 및 축 방향 길이는 100mm 및 200mm로 고정하고 설계를 하고자한다. 이 제약조건은 본 논문에서 설계하고자 하는 영구자석형功力 발전기에 비해 출력이 50% 작으면서 회전속도가 200% 큰 유도전동기의 사양이므로, 이 제약조건을 만족하는 발전기가 설계된다면 영구자석 사용으로 인한 소형화 및 고 출력화를 이루었다고 말할 수 있다. 그러나, 이렇게 발전기의 사이즈가 결정될 경우 토크에 영향을 미치는 요소는 코일의 직경을 1mm라 하면 정격전류만이 남게 되기 때문에 정격토크를 발생시키기 위해서는 정격전류를 가변시켜야만 한다. 이 경우, 정격전류가 최대 허용전류를 넘게 되면 안 되는데 본 보고서에서 사용하는 냉각 방식을 자냉이란 경우의 전류 밀도 5~6A/mm²에서 6A/mm²을 택한 경우의 허용전류는 4.7A이므로 정격전류가 이 범위를 넘어서는 안 된다.

표 1 설계변수에 따른 토크 특성해석으로부터 얻어진 설계변수의 비

	Radial	Parallel	Halbach
Ri/Ro	0.7	0.65	0.6
a_p	0.75	0.8	0.5
Ro/Rc			0.95
Rc/Rs			0.88

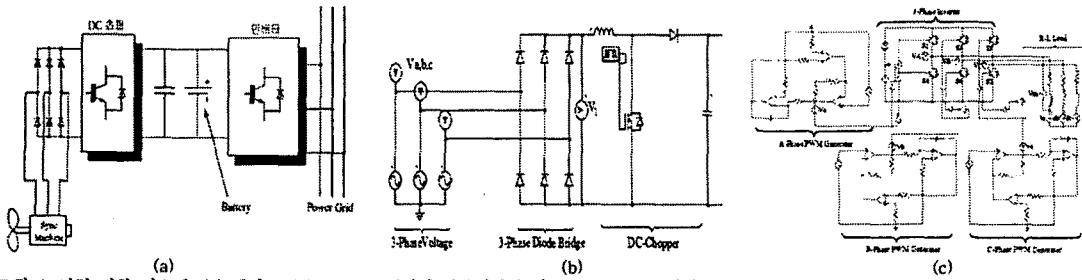


그림 4. 전력 변환 시스템: (a) 개념도, (b) AC-DC 컨버터 시뮬레이션 및 (d) DC-AC 인버터 시뮬레이션.

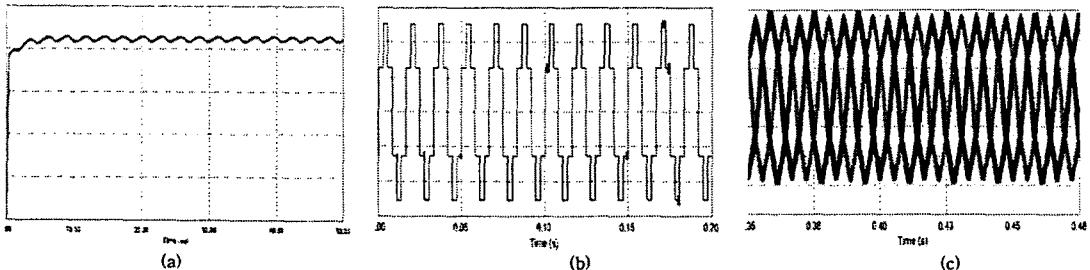


그림 5. 시뮬레이션 결과: (a) 그림 4 (b)로부터 얻어진 직류 전압, (b) 그림 4(c)로부터 얻어진 한 상 전압 및 (c) 그림 4 (c)로부터 얻어진 3 상전류.

표 2 설계변수에 따른 토크 특성해석으로부터 얻어진 설계변수들

	Radial	Parallel	Halbach	요구 사양
P (정격용량)	450W			
ω (정격 속도)	900 rpm			
T (정격 토크)	4.8 N·m			
제약 조건				
R_D (발전기 외 반경)	50mm			
L_s (축 방향 길이)	200mm			
설계 결과				
R_i (영구자석 내반경)	21.65mm	19.175mm	17.7mm	
R_o (영구자석 외반경)		29.5mm		
R_c (코일 내반경)		31mm		
R_s (코일 외반경)		35mm		
a_p (극호비)	0.75	0.8	1	
N (극 당 상당 단수)		22 turns		
I_i (정격 전류)	4.2A	3.6A	2.75A	
E (상당 역기전력)	50V	57.5V	78V	
R (상당 저항)		0.88ohm		

5. 설계결과에 대한 검증

그림 3은 표2에 제시된 설계결과에 대하여 각각의 자화패턴에 따른 역기전력과 토크에 대한 해석결과와 유한요소 해석결과와의 비교와 영구자석 체적당 역기전력 및 동순의 비교를 보여준다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 해석결과와 유한요소결과는 매우 잘 일치하며, 체적당 역기전력은 반경 방향 자화가 동순 측면에서는 할박 자화가 우수한 특성을 보였다.

6. 전력 변환시스템

그림 4와 5는 각각 소 용량 풍력 발전시스템의 전력변환 개념도 및 AC-DC, DC-AC 변환 부와 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 시스템의 장점은 발전된 AC 출력을 스위칭 소자대신에 값싼 다이오드 브리지를 사용하여 DC 출력으로 변환 가능하므로, 위치 혹은 속도 센서가 이 시스템에서는 불필요하며, 이 전버터에서는 오직 하나의 스위칭 소자(췌퍼)만이 사용되므로 생산가격을 낮게 할 수 있다는 점이다. 게다가, 이 시스템은 DC 전압이 항상 일정하므로 유일하게 발전 전력을 제어하기 위하여 출력 전류만을 제어하면 되므로 제어회로가 간단해 진다. 이 시스템은 전력이 역류하기 어렵기 때문에 많은 발전 장치를 인버터에 병렬로 연결할 수 있다 [1].

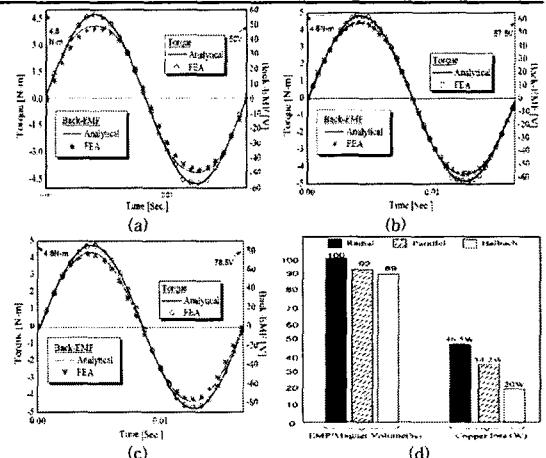


그림 3. 설계결과에 대한 검증: 토크 및 역기전력에 대한 해석결과와 유한요소해석결과와의 비교 ((a) 반경방향 자화, (b) 평행방향 자화, (c) Halbach 자화) 및 (d) 영구자석 체적당 역기전력 및 동순 비교.

7. 결론

본 논문은 소용량 풍력 시스템에 요구되는 발전기의 설계 및 전력변환 시스템에 대하여 논의 하였다. 먼저, 다양한 자화 패턴을 갖는 회전자에 의한 무부하시자계, 전기자 권선에 의한 자계, 토크, 역기전력, 저항 및 인덕턴스 특성식에 대한 해석 해를 2차원 공간고조파법을 이용하여 도출한 뒤, 설계변수에 따른 토크 특성으로부터 여러 변수에 대한 적절한 그리고 최적의 설계변수 비를 얻었다. 이 설계변수 비에 제약 조건을 대입하여 최종적으로 발전기의 치수 변수 및 정격을 얻었으며, 유한요소 해석을 통하여 설계의 타당성을 검증하였다. 마지막으로 소용량 풍력 발전시스템에 적합한 전력변환 시스템을 제시하고 그에 따른 시뮬레이션 결과 역시 제시하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Naoki Yamamura, Muneaki Ishida and Takamasa Hori, "A Simple Wind Power Generating System with Permanent Magnet Type Synchronous Generator", IEEE PEDS'99, 849-854, July 1999.