

풍력용 소용량 영구자석형 발전기의 설계

장 석명*, 최 장영*, 조한욱*, 유대준*, 경남호**

* 충남대학교, ** 한국에너지기술연구원

Design of Small-Scaled Permanent Magnet Generators for Wind Power Applications

Seok-Myeong Jang*, Jang-Young Choi*, Han-Wook Cho*, Dae-Joon You* and Nam-Ho Kyoung**

*Chungnam National University, **Korea Institute of Energy Research

Abstract - This paper deals with design of a small-scaled permanent magnet generator (PMG) for wind power applications. First, this paper determines rated power and rated speed of the PMG from measured characteristics of wind turbines. Second, we derive analytical solutions for the open-circuit field in order to determine optimum magnet thickness and pole pitch/arc ratio. Third, on the basis of open circuit field solutions, stator magnetic circuit is designed. And then, a diameter of stator coil which agree with a required current density is calculated, and its turns are determined from the area of slot. Finally, finite element (FE) method is employed for validity of the designed PMG and, the back-emf measurements are also given to confirm the design.

1. 서 론

천연 에너지를 이용하는 발전 시스템은 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 있으며, 이러한 대용량 시스템에는 주로 이중여자 권선형 유도발전기가 사용되고 있다. 또한 최근 들어 적게는 30kW에서 100kW 급까지의 영구자석형 풍력 발전기가 소·중 용량 부하를 위해 세계적으로 응용·개발되고 있는 추세이다 [1].

따라서 본 논문은 중·대용량 풍력 발전을 위한 시작점으로 소용량 450W, 1200rpm 급 영구자석형 풍력 발전기의 설계에 대하여 다루고자한다. 우선, 영구자석형 풍력용 발전기의 반경방향 및 평행방향 착자된 회전자에 대한 무부하시 자계분포 특성식을 2차원 극 좌표계 및 자기벡터 자위를 이용하여 도출하였다. 도출된 무부하시 자계 특성식을 이용하여 최적의 영구자석 두께 및 극호비를 결정한 후 더 나아가 주자속에 의해 포화되지 않는 범위의 요크 두께 및 치폭을 결정하였다. 다음으로, 자기등가회로를 이용하여 슬롯 개구폭 및 바닥폭 등의 고정자 자기회로를 설계하고, 설계된 자기회로의 슬롯 면적과 발전기의 요구 정격으로부터 고정자 코일의 직경 및 턴 수를 선정하였다. 마침내 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 정격 부하저항에서 회전속도의 변화에 따른 발전 전압 및 토크와 정격 부하저항 변화에 따른 즉 발전 전압 대 전류 및 토크에 대하여 조사함으로써, 설계된 발전기의 타당성을 검증하였다. 마지막으로 본 논문에서 도출된 설계변수를 이용하여 제작된 풍력 발전기의 상 및 선간 역기전력 특성 실험을 통해 설계의 타당성을 역시 검증하였다.

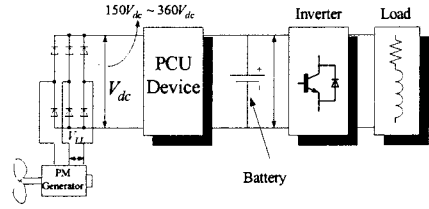


그림 1. 영구자석형 발전기가 사용된 풍력 발전시스템.

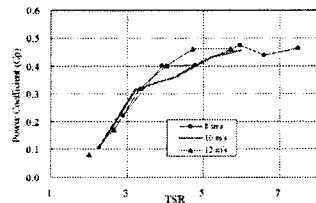


그림 2. 추정된 풍력 터빈의 Cp vs. TSR

2. 영구자석형 풍력 발전기의 정격 선정

2.1 제안된 풍력발전시스템의 개요

그림 1은 영구자석형 풍력 발전기, 풍력 터빈, 3상 정류기, 정류된 전압을 일정 전압으로 바꾸어 주는 PCU 장치, 배터리 및 인버터로 구성된 영구자석형 풍력 발전 시스템의 개념 도를 보여준다. 여기서 소용량 발전의 경우 즉 계통에 연계하지 않을 경우 인버터 없이 특정 DC 부하에 직접 연결할 수도 있다.

2.2 정격 용량 및 정격 속도

영구자석형 풍력발전기의 정격 용량 및 정격속도는 풍력 터빈의 그것들로부터 결정된다. 풍력터빈의 정격 용량은 식 (1)로 주어진다 [2].

$$P_t = 0.5C_p \rho \pi R^2 v^3 \tag{1}$$

여기서 R, v 및 ρ는 각각 터빈 날개의 반경, 풍속 및 공기밀도를 나타낸다. Cp는 전력계수로 그림 2에 제시된 것처럼 TSR 즉 풍속에 대한 날개끝 선속도에 따라 변화하며 대부분의 경우 Cp는 0.5 이하의 값을 갖는다. 한편, 풍력 발전에 사용될 터빈의 속도는 'stall control'에 의해 제어되는데, 이 제어 방법은 터빈의 피치각을 조절할 필요 없이 터빈의 공기역학적인 특성에 의해 터빈의 회전속도가 일정속도 이상이 되면 실속 현상에 의해 회전속도가 더 이상 증가하지 않는 현상을 이용한 것이다. 따라서 본 논문에서 사용될 풍력터빈의 정격용량은 식 (1)과 그림 1의 결과 그리고 실험으로부터 300W로 정해지며 최대 용량은 330W로 정해졌다. 또한 터빈의 정격회전속도는 1200rpm이고 최대 회전속도는 1500rpm임을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 결과적으로 풍력발전기의 정격 용량 및 속도는 450W 및 1200rpm으로 각각 정해졌다.

2.3 발전전압

그림 1에서 알 수 있듯이, 영구자석형 풍력 발전기에 서 정류된 전압은 PCU 장치를 거쳐 일정한 직류 전압으로 변환된다. 본 발전기 설계에서 함께 개발하고자 하는 PCU의 입력 전압 범위는 150Vdc~360Vdc 이므로 발전기 발전전압의 상 전압 최대 값은 식 (2)에 의해 결정된다.

$$V_{pp} = \frac{\sqrt{2} V_{dc}}{1.35\sqrt{3}} \quad (2)$$

따라서 식 (2)에 의해 발전전압의 상전압 최대값의 범위는 90V~210V이다. 한편 풍력터빈의 최대 회전속도는 1500rpm으로 제한되었기 때문에 1500rpm일 때 최대 상전압을 210V라 하면 상전압이 90V일 때의 rpm은 640rpm이다. 즉 PCU의 입력 범위로부터 발전기의 발전상전압을 계산하고 이로부터 PCU의 출력이 일정한 직류전압을 얻도록 하는 회전속도의 범위를 예측할 수 있다. 결과적으로 PCU의 출력이 일정하게 나오도록 하는 발전전압의 범위는 90V~210V이고 이에 따른 회전속도의 범위는 640rpm~1500rpm 이다.

2.4 정격토크 및 전류

전기의 출력은 식 (3)과 관계가 깊다.

$$P = T\omega = 3V_{rms} \cdot I_{rms} = 3V_{pp} \cdot I_{pp}/2 \quad (3)$$

풍력터빈의 정격 회전속도는 1200rpm이라고 했으므로, 식 (3)에 의해 정격 토크는 3.58Nm이고 상당 최대전류는 1.8A이다. 그리고 이때의 정격 역기전력 즉 무부하시 정격 전압의 최대 값은 168V가 된다. 결론적으로 정격속도 1200rpm으로 발전기가 회전하고 발전기의 정격 부하 94이 연결되었을 때 식 (3)을 만족하는 전류, 토크 및 발전전압이 나오도록 발전기 회전자 및 고정자의 치수변수와 권선사양을 설계하도록 한다.

3. 영구자석형 풍력 발전기의 설계

3.1 회전자

3.1.1 영구자석의 외반경 및 축 방향 길이

영구자석의 외반경 즉 회전자의 외반경은 식 (4)로 주어지는 TRV에 의해 대략적으로 구할 수 있다 [3].

$$TRV = \pi D_r^2 L_{stk} / 4 \quad (4)$$

여기서 T, D_r 및 L_{stk}는 각각 기기의 토크, 회전자의 외경 및 축 방향 길이를 나타낸다. K는 영구자석의 재질 및 기기의 구조에 따라 결정되어지는 상수로 [3]에 경우에 따라 자세히 기술되어 있다. 그림 3(a)는 식 (4)로부터 얻어진 축 방향 길이에 대한 회전자 외경을 보여주며, 발전기 사이즈에 대한 구속 조건이 없다면 기동토크를 줄이기 위하여 회전체의 질량에 비례하고 반경의 제곱에 비례하는 관성을 고려하여 회전자의 사이즈를 결정하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 그림 3(a)의 결과를 토대로 발전기의 전체 외경 및 관성을 고려하여 회전자 외경과 축 방향 길이를 경험적으로 각각 42mm와 110mm로 정하였다.

3.1.2 영구자석의 내 반경 및 극수

영구자석의 내 반경 및 극호비를 정하기 위하여 본 논문은 회전자 영구자석에 의한 지배방정식을 2차원 극 좌표계 및 자기 벡터 자위를 이용하여 식 (5)와 같이 유도하였다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{A}_n^I &= 0 && \text{in the air-gap regions} \\ \nabla^2 \mathbf{A}_n^{II} &= -\mu_0 (\nabla \times \mathbf{M}_n) && \text{in the PMs} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{A}_n 은 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}_n$ 으로 정의되는 자기벡터 자위를 나타내며, 회전기의 기하학적인 구조로 인해 z-방향만 존재한다. 위 칩자 I 및 II는 각각 공기 영역과 영구자석영역을 대표하며 μ_0 및 \mathbf{M}_n 은 각각 공기의 투자율과 영구자석의 자화를 나타낸다. 표면 부착형 영구자석의

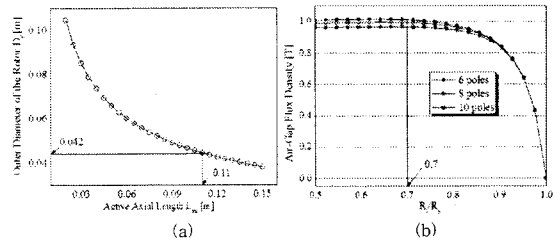


그림 3. (a) 회전자 축 방향 길이에 따른 축 직경의 변화 및 (b) 영구자석 두께에 따른 자속밀도의 변화

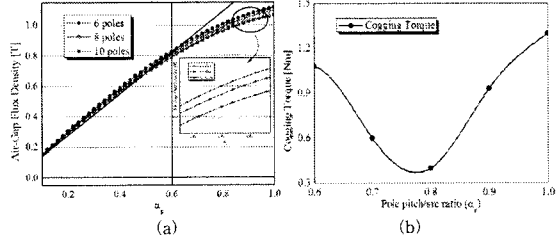


그림 4. 영구자석 극호비에 따른 (a) 자속밀도 및 (b) 코깅토크 변화.

자화 종류에는 크게 반경방향 자화, 평행 방향 자화 및 Halbach 자화가 있다. 일반적으로 평행방향 자화가 반경방향자화에 비해 동일영구자석체적에서 발생하는 공극자속밀도가 높고 착자가 쉬워 영구자석 가격이 싸며 코깅토크 역시 작게 발생하여 기동토크측면에서 유리하다. 더 높은 그리고 정현적인 공극 자속밀도를 얻기 위해서 Halbach 자화가 대안이 될 수 있으나, 착자된 영구자석의 조립이 어렵고 (특히 중, 대용량인 경우) 영구자석의 사용량이 많아 제작비가 비싸지는 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 영구자석의 자화종류를 경제성 및 효율성 측면에서 평행방향자화로 선택하였다. 한편, 식 (5)의 해를 벡터자위의 정의에 대입함으로써 미정계수가 포함된 각 영역의 자속밀도를 구할 수 있고, 이 자속밀도에 경계조건을 대입하여 미정계수를 구할 수 있다. 그림 3(b)는 식 (5)로부터 얻어진 자속밀도에 대한 해석해로부터 얻어졌으며 고정된 영구자석의 외반경 R_o(21mm)에 대하여 영구자석의 내반경 R_i의 변화에 따른 공극 자속밀도의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 R_i/R_o의 비가 0.7 이하에서는 자속밀도의 변화가 거의 없기 때문에 우리는 영구자석의 내반경을 15mm로 정하였다. 한편, 1200rpm의 회전속도에서 발전전압의 주파수를 60Hz로 하기 위해서는 영구자석의 극수는 6극이어야 한다. 그림 3 (b)에서 알 수 있듯이, 극수가 커질수록 자속밀도가 감소할지라도 발전기의 동일 사이즈에서 극수가 증가할수록 발전기의 발전전압은 극쌍수에 비례하여 커지기 때문에 극수 증가에 따른 자속밀도를 감소하고 극수를 늘리는 것이 발전기의 성능 측면에서 유리하다. 또한 본 논문에서 제시된 풍력발전시스템은 발전전압을 정류해서 사용하기 때문에 극수가 높으면 주파수가 커지므로 정류전압의 리플성분 감소 측면에서도 극수가 많으면 좋다. 그러나 극수를 10극 이상으로 할 경우 본 논문의 발전기 고정자의 슬롯 수 증가로 인해 치 피치의 길이가 치 폭에 비해 작게 되므로 설계가 부적절하게 되어 우리는 회전자 극수로 8극을 선택하였다.

3.1.3 영구자석의 극호비

그림 4(a)에서 알 수 있듯이, 영구자석의 극호비가 0.6까지는 자속밀도의 크기가 선형적으로 증가하며 0.6 이상에서는 증가폭이 둔화됨을 알 수 있다. 한편, 풍력용 영구자석형 발전기에서 기동토크가 큰 경우 풍력 터빈이 컷 인 스피드에서 동작되지 못할 수도 있기 때문에 기동토크가 작게 설계되어야 한다[4]. 영구자석형 발전기에서 기동토크 중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 바로 코깅토크이며 코깅토크를 줄이는 가장 확실한 방법은 영구자석

혹은 고정자에 스류를 시행하는 것이지만, 소용량 발전기에서는 제작단가 상승의 요인이 된다. 또 다른 저감방안은 영구자석의 극호비를 조절하는 것으로 그림 4(b)에서 알 수 있듯이, 극호비가 0.8인 경우 코깁토크가 가장 작으며 정격토크의 8%에 해당하는 토크이다. 이 밖에도 코깁토크가 슬롯 개구 폭에 비례한다는 특징으로부터 슬롯 개구 폭을 작게하여 코깁토크를 저감할 수 있지만, 이는 코일의 지름에 의존적이기 때문에 한계가 있다.

3.2 고정자

3.2.1 치 폭 및 요크 두께

고정자의 치수 변수 중 가장 중요한 부분이 고정자 요크의 두께 및 치 기둥 폭이라 할 수 있는데, 이 두 부분의 치수는 식 (6)으로 주어지는 방정식에 의해 결정되며, 이는 포화되지 않는 범위에서 가감할 수 있다[5].

$$w_{bi} = \phi_g / [2B_{max} k_{st} L] \quad (6.a)$$

$$w_{ib} = 2w_{bi} / N_m \quad (6.b)$$

여기서 w_{bi} 는 요크두께, w_{ib} 는 치 기둥 폭, ϕ_g 는 공극자속, B_{max} 는 요크의 포화자속밀도, N_m 는 극 당 상당 슬롯 수, k_{st} 는 적층 계수 및 L은 발전기의 유효 축 방향 길이를 나타낸다. 또한, 식 (6)에서 알 수 있듯이, 공극자속밀도를 알아야 공극 자속을 구할 수 있으므로, 3.1.2 절에서 논의된 무부하시 자계특성식은 매우 유용하다. 이 외의 고정자 치수변수는 [5]에 제시된 설계 특성식을 사용하여 대략적으로 유도할 수 있으며, 최종적인 변수는 유한요소해석프로그램을 통해 정하게 된다.

3.2.2 권선 사양

권선은 보통 정격 부하전류의 크기에 따라 직경이 결정되며, 권선 직경이 결정되면 슬롯 면적에 점적률을 고려하여 턴 수가 산정된다. 특히, 정격 부하전류를 구할 경우 전류밀도가 중요한다, 보통 냉각방식을 자냉이러한 경우 전류밀도는 5~6A/mm²로 전류밀도로 잡지만, 실제 발전기의 경우 전류밀도의 여유분이 더 들 수 있다. 결론적으로 본 논문에서는 전류 밀도를 5A/mm²로 정하고 이에 따라 권선 두께 및 턴 수를 산정하였다.

4. 유한요소해석 프로그램을 사용한 설계결과 검증

4.1 포화 및 무부하시 발전전압

그림 5(a)는 부하시 발전기의 포화 확인을 위한 그림을 보여주며, 포화가 일어나지 않음을 알 수 있다. 그림 5(b)에서 알 수 있듯이, 정격속도 1200rpm에서 약 168V의 역기전력이 발생하므로 발전전압 측면에서 설계가 잘 이루어 졌음을 알 수 있다.

4.2 부하변화 및 회전속도에 따른 발전 특성

그림 6 (a) 및 (b)는 각각 정격속도 하에서 부하 변화 및 정격부하 하에서 발전기의 속도 변화 따른 발전기의 특성을 보여준다. 정격 부하저항에서 정격 전류 및 정격 전력이 발생하고 정격속도에서 정격 토크 및 정격 전압이 발생하는 것으로 보아 발전기의 설계가 잘되었음을 확인할 수 있다.

5. 실험결과 및 토의

그림 7(a) 및 (b)는 각각 설계된 영구자석형 발전기의 개략도 및 실제제작모형을 보여준다. 그림 8 (a) 및 (b)는 각각 제작된 발전기의 상단 역기전력 및 선간 역기전력 측정결과를 보여준다. 비록 진동기로 쓰인 DC 진동기의 회전속도에 의해 상역기전력은 2235rpm에서 선간 역기전력은 2175rpm에서 측정되었을지라도 역기전력은 회전속도에 비례한다는 사실에 비추어 보아 이 측정결과는 설계의 타당성을 뒷받침해준다.

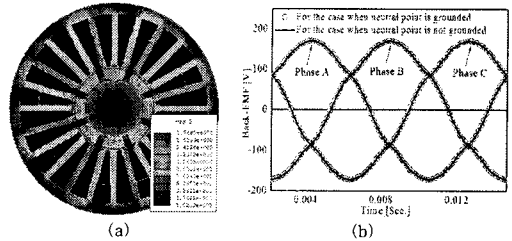


그림 5. (a) 포화 특성 및 (b) 정격속도에서 무부하시 발전전압.

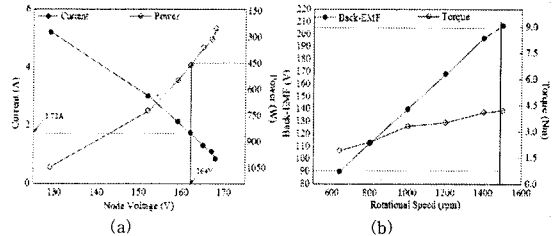


그림 6. (a) 부하변화 및 (b) 회전속도에 따른 발전특성

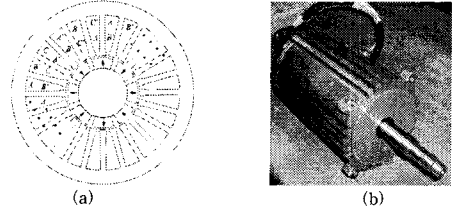


그림 7. (a) 설계된 발전기의 개략도 및 (b) 실제제작모형.

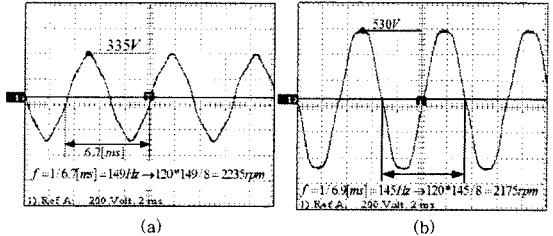


그림 8. 역기전력 측정: (a) 상 및 (b) 선간 역기전력.

6. 결 론

본 논문은 영구자석형 풍력 발전기의 설계에 대해 다루었다. 설계된 결과는 유한요소 해석에 의해 그리고 실험결과에 의해 타당성을 입증하였다. 따라서 본 논문에서 제시된 설계에 대한 일련의 과정은 풍력용 영구자석형 발전기의 설계에 매우 유용할 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 실험 및 해석해보로부터 제어정수를 도출하여 다양한 풍속에 대하여 동특성 시뮬레이션을 수행할 것이다.

[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*, pp. 849-854, July 1999.
- [2] E.Spooner and A. C. Williamson, "Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications", *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol.143, No.1, pp. 1-8, Jan. 1999.
- [3] J.R.Hendershot, TJE Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Magna Physics, 1994.
- [4] W.wu, V.S. Ramsden, T. Crawford and G. Hill, "A Low-Speed, High-Torque, Direct Drive Permanent Magnet Generator for Wind Turbines", *IEEE Industry Applications Conference*, Vol.1, pp. 147-154, Oct. 2000.
- [5] D.C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, McGraw-Hill, Inc.,1994.