

코깅토크 저감을 위한 최적 극호비를 갖는 영구자석형 풍력발전기의 설계

장석명*, 김진순*, 고경진*, 최장영**, 윤기갑***
 충남대학교*, 한라공조 연구소**, 전력연구원***

Design of Permanent Magnet Type Wind Power Generators for Cogging Torque Reduction with Optimum Pole Arc Pitch Ratio

Seok-Myeong Jang*, Jin-Soon Kim*, Kyoung-Jin Ko*, Jang-Young Choi**Gi-Gab Yoon***
 Chungnam National University*, Halla Climate Control**, Korea Electric Power Research Institute***

Abstract - In order to achieve a gearless construction of the wind energy conversion system(WECS), a low-speed generator should be used. Of the various candidate machine types, radial-field, multi-pole, permanent magnet, synchronous machines may be used for low-speed applications. So, this paper deals with the design of direct-coupled, multi-pole radial field machines with permanent magnet(PM) excitation for wind power applications for cogging torque reduction through the determination of optimum pole arc/pitch ratio. On the basis of an equivalent magnetic circuit method(EMCM) and a space harmonic method(SHM), an initial design is performed considering restricted conditions. And then, a detailed design is made using a non-linear finite element analyses(FEA). Finally, test results concerning generating characteristics are given to confirm the validation of the design.

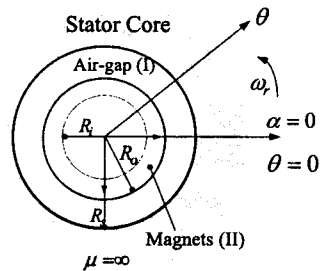


그림 1. 영구자석 풍력발전기 해석 모델

을 도출하였다. 그리고 도출된 해석결과는 유한요소해석 법과 실험을 통해 설계 및 해석결과의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

최근 수용가와 도로나 산간지방에서 20kW 정도의 단독 발전/배터리 시스템용 소·중용량 풍력 발전기의 수요가 증가하고 있으며, 이와 관련된 많은 연구가 수행되고 있다.[1] 이러한 용도의 발전기는 터빈과 직접 연결하기 쉬우며, 풍력 타워에 설치하기가 용이하도록 발전기의 경량화가 필수적이다. 이 경우 기어박스 없이 발전기를 풍력터빈에 직접 연결하면 기어박스를 통해 연결할 때 보다 풍력발전시스템의 무게를 감소시켜 경량 화됨은 물론 풍력발전시스템의 전체 효율 및 신뢰성을 높일 수 있고, 유지·보수비를 경감시킬 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 풍력터빈과 직접 연결된 발전기는 풍력터빈의 속도로 인해 매우 낮은 속도의 영역범위 안에서 운전되며 동시에 이 속도에 대응하여 일반적인 주파수 범위의 60Hz를 갖는 전력을 생산해야만 한다.[2]

본 논문은 위와 같은 풍력발전시스템에 적용이 가능한 저속용 영구자석 동기발전기의 설계와 해석을 다루고 있다. 우선 풍력발전시스템에서 요구되는 출력과 제약 조건이 고려된 공간고조파법과 자기등가회로법에 의한 해석적 방법을 이용하여 초기설계를 하였고, 이로부터 얻어진 해를 이용하여 역기전력, 인덕턴스 등의 회로정수를 도출하였다. 또한, 직구동 영구자석 풍력발전기의 경우 코깅토크의 저감이 필수적이므로 이에 대한 해석적 접근 방법을 제시하고 제시된 방법을 유한요소해석법을 이용하여 검증하였다. 이로부터 코깅토크 저감을 위한 최적 극호비를 도출하였고, 등가회로법과 D-Q 해석법을 이용하여 해석모델의 회전속도 및 부하에 따른 발전특성

2. 영구자석 풍력발전기의 특성 해석

2.1 영구자석에 의한 자계특성해석

그림 1은 영구자석 동기발전기의 영구자석에 의한 자계특성 해석을 위한 단순화된 해석 모델을 보여준다. 여기서 고정자 구조는 슬롯리스 구조로 표현되었지만, 이 모델은 2-d 퍼미언스 함수를 적용하여 슬롯티드 모델에도 적용이 가능하다. 여기서 고정자 코어의 비투자율은 무한대, 영구자석의 비투자율은 1, 회전자 축의 비투자율은 상수로 가정하였다.

영구자석 영역에는 전류가 없으므로, $\nabla \times H = 0$ 이고, $\nabla \times B = \mu_0 \nabla \times M$ 이며, 자기벡터자위 A 는 $\nabla \times A = B$ 로 정의된다. 쿨롱게이지 $\nabla \cdot A = 0$ 을 적용하여 공극 영역(I)과 영구자석 영역(II)에 대하여 식(1), (2)이 도출된다.

$$\nabla^2 A^I = 0 \tag{1}$$

$$\nabla^2 A^{II} = -\mu_0 \nabla \times M \tag{2}$$

여기서 M 은 평행방향 착자된 영구자석의 자화를 나타낸다. 식(2)의 일반해와 경계조건으로부터 공극영역에서의 반경방향 자속밀도는 식(3)과 같이 얻어진다.

$$B_r^I(r, \theta) = \sum_{n=1, odd}^{\infty} K_b(n) f_{br}(r) \cos(np\theta) \tag{3}$$

여기서 n 과 p 는 각각 고조파 차수와 극 쌍수이다. $K_b(n)$ 과 $f_{br}(r)$ 은 주어진다.[3]

2.2 역기전력 해석

해석 모델의 고정자 권선은 2층권으로 되어 있으며 코일을 쇠교하는 자속은 식(4)에 의해 계산된다.

$$\Phi_{PM} = N\Lambda_0 \left[\int_{-\delta_y}^{\delta_y/2} K d\alpha + \int_{-\delta_y/2+\beta}^{\delta_y/2+\beta} K d\alpha \right] \quad (4)$$

여기서 N 은 상당 턴수이고, Λ_0 는 $\mu_0=0$ 인 경우 비퍼미언스의 평균값이며, $K=B_r'(R_s, \alpha, t)R_s l_a$ 이다. δ_y , l_a 와 β 는 고정자 권선의 피치각, 발전기의 축방향길이, 2층권의 상단과 하단의 기계각이다. 상당 유도된 역기전력 전압은 식(5)와 같이 주어진다.

$$V_{emf} = -d\Psi_{pm}/dt = 2pw_r NR_s \Lambda_0 \dot{\alpha} \cdot \sum_{n=1, odd}^{\infty} K_B(n) f_w(R_s) \cos np(\delta_y/2 - \omega_r t) + \cos np(\delta_y/2 - \omega_r t + \beta) \quad (5)$$

3. 영구자석 풍력발전기의 전자기설계

3.1 제약조건

영구자석 동기발전기를 설계하기 전에 발전기 치수에 영향을 미치는 요소와 설계제한은 표 1에서 정리된 내용과 같다.

표 1. 영구자석 동기발전기 설계의 제약조건

영구자석 발전기의 전체적인 크기	
고정자 외반경(R_{so})	≤ 90 [mm]
고정자 내반경(R_{si})	≥ 45 [mm]
축길이 (l_a)	≤ 75 [mm]
기동토크	
코깅토크	$\leq 5\%$
히스테리시스토크	$\leq 5\%$
영구자석발전기 각 접점 자속밀도[4]	
공극자속밀도(B_g)	$\approx 0.9-1.0$ [T][5]
자속밀도 고정자 치(R_{st})	≤ 1.5 [T]

3.2 회전자 체적 결정

회전자의 외경과 축방향길이는 회전자의 단위 체적당 토크를 계산함으로써 결정할 수 있다.[6]

$$TRV = T_{out} / \frac{\pi}{4} \cdot D_0^2 l_a \quad (6)$$

여기서 T_{out} 은 출력토크이고, D_0 는 회전자의 외경, l_a 는 회전자의 축방향길이이다. 그림 2(a)는 식(6)을 이용하여 회전자 외경과 축방향길이에 따른 체적당 토크를 해석한 결과이며, 이 결과를 이용하여 표 1의 구속조건을 만족하는 회전자 외경과 축방향길이를 각각 90[mm]와 68[mm]로 결정하였다. 그림 2(b)는 회전자의 축반경(내반경)과 외반경, 즉 영구자석 두께와 영구자석의 극호비에 따른 자속밀도 특성을 보여준다.

3.3 고정자 형상 및 권선 설계

고정자 치와 요크의 자속은 기기 성능을 결정하는데 중요한 역할을 한다.[7] 따라서, 고정자 치와 요크가 포화되지 않도록 고정자의 두께와 너비를 결정해야하며 식(7)을 이용하여 고정자 두께와 너비를 계산할 수 있다.

$$W_{bi} = \frac{\Phi_g}{2B_{max} k_{st} l_a}, W_{tb} = \frac{4p}{Q_s} W_{bi} \quad (7)$$

여기서 W_{bi} 는 고정자 요크 두께, W_{tb} 는 치 폭이다.

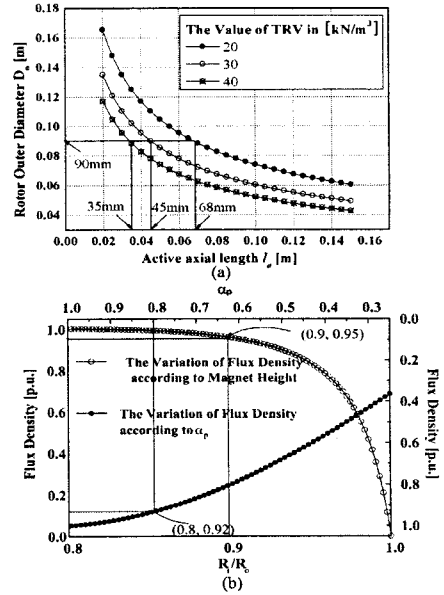


그림 2. (a) TRV의 축 길이에 대한 회전자 외경, (b) 영구자석 두께와 극호비에 따른 자속밀도

B_{max} 는 고정자 치와 요크의 포화를 고려한 허용가능한 자속밀도의 최대값이고, k_{st} 는 적층상수이며 일반적으로 0.95이다. Q_p 는 고정자 슬롯의 수이다. Φ_g 는 공극 자속이고, 식(8)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Phi_g = \int_{-l_a/2}^{l_a/2} \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} \lambda(R_s, \alpha) B_r'(R_s, \alpha) d\alpha dx \quad (8)$$

4. 코깅토크 저감

4.1 코깅토크 해석

높은 기동토크 때문에 직구동 풍력 시스템에서는 기동토크가 중요한 설계 요소이다. 이 기동토크는 코깅토크의 주 요소이며, 기동토크를 줄이기 위해서는 코깅토크를 줄이는데 필수라고 할 수 있다. 따라서 기동토크와 관련된 코깅토크를 예측하기 위해서 본 논문은 에너지 변분법에 따라 정리된다.

$$T_{cogging} = -\frac{\partial W(\theta)_{air-gap}}{\partial \theta} \quad (9)$$

여기서 $\partial W(\theta)_{air-gap}$ 은 전자기장 에너지 공극에 의해 주어진다.[8]

$$W(\theta)_{air-gap} = \frac{1}{2\mu_0} \int [\lambda(r, \alpha) B_r'(r, \theta)]^2 dv \quad (10)$$

여기서 $\lambda(r, \alpha)$ 는 2-d 비퍼미언스 함수이며 식(11)로 주어진다.[8]

$$\lambda(r, \alpha) = \sum_{\mu=0,1,2,\dots}^{\infty} \Lambda_{\mu}(r) \cos \mu Q_s (\alpha + \alpha_{sa}) \quad (11)$$

여기서 α_{sa} 는 권선 피치에 의해 결정된다.

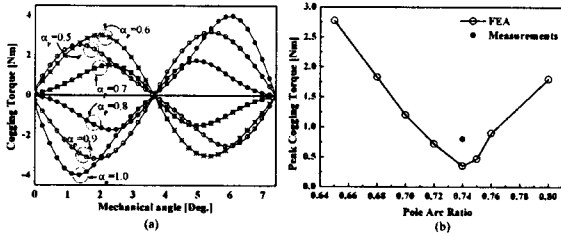


그림 3. (a) 영구자석 극호비에 따른 코깅토크 해석 결과, (b) 유한요소법과 실험을 통한 코깅토크의 최대값

4.2 극호비

그림 3에서 극호비가 0.7인경우가 제일 작음을 확인할 수 있고, 극호비가 0.5~0.7인 경우 코깅토크는 +에서 -로 변하는 반면 0.8~1.0의 경우에 코깅토크는 -에서 +로 변함을 알 수 있다. 코깅토크를 연구한 대부분의 논문에서 알 수 있듯이 +로 혹은 -로 시작하는 코깅토크가 그 반대의 부호로 시작하는 코깅토크로 변하는 극호비 사이에서 코깅토크가 최소가 되기 때문에 0.7~0.8사이에 코깅토크가 최소가 되는 극호비가 존재함을 그림 3.(a)로부터 예측할 수 있고 유한요소법과 실험을 통해 그림 3.(b)로 확인할 수 있다.

5. 설계 결과 및 검토

그림 4.(a)는비선형 유한요소법과 본 논문의 설계방정식으로부터 제작된 영구자석 동기발전기의 모델을 보여준다., 그림 4.(b)에서 영구자석 동기발전기의 설계 사양은 영구자석의 내경과 외경은 40[mm]와 45[mm]이고, 회전자의 외경 46[mm]이다. 제작된 해석 모델의 극쌍수는 8이며, 슬롯 수는 48슬롯, 상당 턴수는 96턴, 축방향길이는 68[mm]이다.

그림 5(a)는 설계 제작된 모델의 역기전력 해석결과이며, 해석적 방법과 유한요소법의 해석 결과가 매우 일치함을 확인할 수 있다, 그림 5(b)는 실험을 통한 역기전력 측정 측정결과 이며 그림 5 (a)와 비교하여 일치됨을 실험을 통해 확인하였다. 이로부터 제작된 모델이 설계 사양과 자속과 권선 사양을 만족함을 알 수 있으며, 추후 부하 시험 등을 통하여 검증이 가능하다.

6. 결 론

본 논문은 기어와 캠 등을 이용하여 속도를 변환하지 않고 직접 접속되어 구동되는 영구자석 풍력발전기의 설계 및 특성해석을 다루고 있다. 풍력발전기는 바람의 세기에 따라 발전량이 결정되며, 이를 위해 초기 기동시 기동 토크가 작아야 한다. 따라서 본 논문에서는 초기 기동시 기동 토크를 결정짓는 코깅 토크의 저감에 대한 해석을 수행하였다.

코깅 토크 저감을 위하여 다양한 해석 방법이 제시되어 왔으나, 본 논문에서는 영구자석의 극호비에 따른 해석을 수행하였고, 이 해석 결과에 따른 코깅토크의 특성을 제시하였으며, 마지막으로 제약조건을 만족하는 영구자석 풍력발전기를 제작하였다. 추후 부하시험 등을 통하여 코깅토크의 해석을 검증할 예정이다.

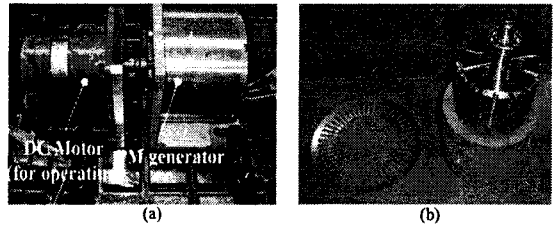


그림 4. (a) 영구자석 동기발전기의 실제모델, (b) 제작된 회전자와 고정자 코어

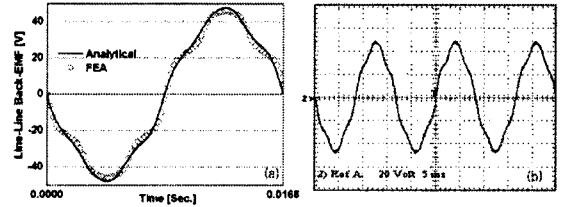


그림 5. (a) 해석적인 방법과 유한요소법에 따른 선간 역기전력, (b) 실험에 의한 역기전력 측정

[참 고 문 헌]

- [1] 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 Trans. Magn., vol.36, no. 5, pp.3802-3809, Sept. 2000.
- [2] L. Soderlund, J-T. Eriksson, J. Salonen, H. Vihriala and R. Perala, "A Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications," IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 4, pp.2389-2392, July 1996.
- [3] Z. Q. Zhu, D. Howe and C. C. Chan, "Improved Analytical Model for Predicting the Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent-Magnet Machines," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 1, pp. 229-238, Jan. 2002.
- [4] E. Spooner and A. C. Williamson, "Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbine applications," IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 143, no. 1, pp.1-8, Jan. 1996.
- [5] W.wu, V.S. Ramsden, T. Crawford and G. Hill, "A Low-Speed, High-Torque, Direct Drive Permanent Magnet Generator for Wind Turbines," Industry Applications Conference, Vol.1, pp. 147-154, Oct. 2000.
- [6] J. R. Hendershot and TJE Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.
- [7] D.C. Hanselman, Brushless Permanent-Magnet Motor Design, The Writers' Collective, 2003.
- [8] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dcPartIII: Effect of Stator Slotting," IEEE Trans. Magn., vol. 29, no. 1, pp. 143-151, Jan. 1993.