

공간고조파법을 이용한 풍력용 영구자석형 발전기의 전자기적 특성해석 및 제어정수 도출

장석영*, 최장영*, 조한욱*, 유대준*, 경남호**, 윤기갑***
 *충남대학교, **한국 에너지 기술 연구원, ***한국 전력연구원

Electromagnetic Analysis and Control Parameter Estimation of Permanent Magnet Generators for Wind Power Applications Using Space Harmonic Methods

Seok-Myeong Jang*, Jang-Young Choi*, Han-Wook Cho*, Dae-Joon You*, Nam-Ho Kyung**, Ki-Kab Yoon***
 *Chungnam National University, **Korea Institute of Energy Research, ***Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Using the MATLAB/SIMULINK, this paper presents dynamic simulation model for 6MW wind power generation systems with the DFIG considering distribution systems and performs the dynamic analysis of wind power systems.

1. 서 론

본 논문은 영구자석형 풍력 발전기의 전자기적 특성해석 및 제어정수 도출에 대하여 다루고자한다. 우선, 영구자석형 풍력용 발전기의 평행방향 착자된 회전자에 대한 무부하시 자계분포 특성 식 및 2층권 고정자 권선에 대한 전기자 반작용 자계분포 특성 식을 2차원 극 좌표계 및 자기벡터 자위를 이용하여 도출하였다. 각각의 자계특성식에 의한 해석적 결과는 유한요소 해석결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 다음으로, 도출된 자계특성식을 이용하여 얻어진 각각의 쇄교자속으로부터 역기전력 및 인덕턴스를 도출하였다. 역기전력 및 인덕턴스에 대한 해석결과 역시 유한요소해석결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 특히, 역기전력 측정 및 인덕턴스 측정결과 또한 해석결과와 타당성을 입증하기 위하여 주어졌다. 따라서 본 논문에서 제시된 제어정수는 영구자석형 풍력발전기의 동특성 해석에 매우 유용하게 쓰일 것으로 사료된다.

2. 풍력발전기의 구조

그림 1 (a)와 (b)는 이중 분포권 고정자 및 8극 평행방향 착자된 영구자석을 갖는 풍력 발전기의 구조 및 실제 제작모델을 보여준다. 발전기의 정격용량 및 속도는 각각 450W 및 1200rpm으로 이는 터빈의 정격 용량 330W 및 속도 1200rpm으로부터 정해진 값이다. 영구자석은 잔류 자속밀도가 1.23T인 NdFeB35가 사용되었고, 발전전압 즉 역기전력 파형을 좀 더 개선시키기 위하여 이중 분포권 권선 구조를 사용하였다. 한편, 회전자에 사용되는 영구자석의 자화 종류에는 반경방향 자화, 평행방향 자화 및 Halbach 배열이 사용될 수 있으나, 제작 단가 및 공정 등을 고려하여 평행 방향 자화된 영구자석이 사용되었다. 표 1은 실제 제작된 영구자석형 풍력 발전기의 치수변수를 나타내고 있다.

3. 정특성 해석

3.1 해석모델

그림 2 (a)와 (b)는 각각 무부하시 자계분포 및 전기자 반작용 자계분포 예측을 위한 해석 모델을 보여주는데, 이렇게 단순화된 해석 모델은 다음과 같은 가정에 근거 한다 [1].

- * 코일 영역 및 영구자석 영역의 투자율은 공기와 같다.
 - * 축 및 고정자 요크에 사용된 철의 투자율은 무한이다.
 - * 고정자 권선의 전류밀도는 고정자 내 반경 즉 $r=R_s$ 에 sheet 전류로 분포한다.
 - * 슬롯타드 고정자 구조는 슬롯리스 구조라 가정한다.
- 결과적으로 그림 2(a)에서 알 수 있듯이, 무부하시 자계 해석은 영구자석영역 (II) 및 공극영역 (I)으로 구분되고, 전기자 반작용 자계 해석은 오직 공기영역만을 고려한다.

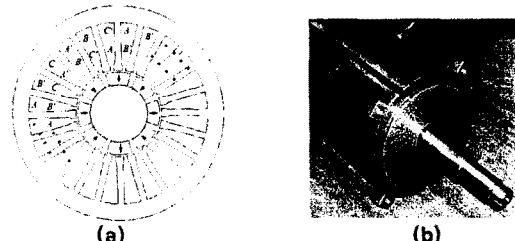
3.2 영구자석에 의한 자계

영구자석의 내 반경 및 극호비를 정하기 위하여 본 논문은 회전자 영구자석에 의한 지배방정식을 2차원 극 좌표계 및 자기 벡터 자위를 이용하여 식 (1)과 같이 유도하였다.

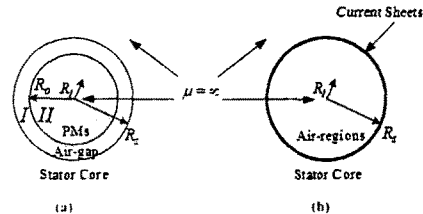
$$\nabla^2 A_n^I = 0 \quad \text{in the air-gap regions}$$

$$\nabla^2 A_n^{II} = -\mu_0 (\nabla \times \mathbf{M}_n) \quad \text{in the PMs} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{A}_n 은 $\mathbf{B}=\nabla \times \mathbf{A}_n$ 으로 정의되는 자기벡터 자위를 나타내며, 회전자의 기하학적인 구조로 인해 z-방향만 존재한다. 위 첨자 I 및 II는 각각 공극 영역과 영구자석영역을 대표하며 μ_0 및 \mathbf{M}_n 은 각각 공극의 투자율과 영구자석의 자화를 나타낸다. 여기서 영구자석의 자화 종류는 평행방향 자화이므로 이는 수식으로 표현하면 반경방향



<그림 1> 이중 분포권 고정자 및 8극 평행방향 착자된 영구자석을 갖는 풍력 발전기:(a) 구조 및 (b) 제작모델.



<그림 2> 해석 모델: (a) 무부하시 자계분포 예측 시 및 (b) 전기자 반작용자계분포 시

및 원주방향 성분을 갖는다. 한편, 식 (1)에서 구한 각각의 영역에 대한 일반해를 그림 2(a)에 대한 경계조건에 대입하면 식 (2)로 주어지는 공극 자속밀도를 얻을 수 있다.

$$B_m^I = - \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \left[\frac{\mu_0 M_{\theta n} (R_s^{-2np} r^{np-1} + r^{-(np+1)})}{2(R_s^{-2np} R_i^{np-1} - R_i^{-(np+1)})} \right] \cos(np\theta) \quad (2)$$

3.3 전기자 코일에 의한 자계

전기자 코일에 의한 자계의 지배방정식은 고정자 코일에 면전류 밀도로 가정되었으므로 그림 2(b)로부터 식 (1)의 라플라스 방정식 형태가 되며 전류원은 경계조건에서 고려된다. 결과적으로 그림 1의 코일이 2층권이므로 식 (3)으로 표현되는 공극 자속밀도를 얻는다.

$$B_{crn} = B_{crn}^{bottom} + B_{crn}^{top} = - \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} np D_n (R_i^{-2np} r^{np-1} + r^{-np-1}) \square$$

$$\left[\begin{aligned} & i_a \left[\sin(np\theta_s) + \sin \left\{ np \left(\theta_s - \frac{\pi}{mp} \right) \right\} \right] \\ & + i_b \left[\sin \left\{ np \left(\theta_s - \frac{2\pi}{3p} \right) \right\} + \sin \left\{ np \left(\theta_s - \frac{2\pi}{3p} - \frac{\pi}{mp} \right) \right\} \right] \\ & + i_c \left[\sin \left\{ np \left(\theta_s - \frac{4\pi}{3p} \right) \right\} + \sin \left\{ np \left(\theta_s - \frac{4\pi}{3p} - \frac{\pi}{mp} \right) \right\} \right] \end{aligned} \right] \quad (3)$$

3.4 쇄교자속

영구자석에 의한 그리고 전기자 코일에 의한 쇄교자속은 식 (4)로 표현된다 [2].

$$\Psi^{PM, coil} = \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} B_{rn}^{PM, coil} (\theta_s, t) R_s l_a d\theta_s \quad (4)$$

여기서 B_{rn} 은 영구자석 혹은 전기자 코일에 의한 공극 자속밀도를 나타내며 α 는 코일 피치, l_a 는 발전기의 유효 축 방향 길이를 나타

낸다. 한편, 영구자석에 의한 자속밀도는 식 (2)에서 알 수 있듯이 회전자 기준 좌표인 θ 에 대한 함수로 나타나기 때문에 식 (4)에 적용하기 위해서는 고정자 기준 좌표 θ_s 로 표현해야만 한다. 즉 $\theta = \theta_s - r^*t$ 로 바꾸어 주는데 여기서 r^* 은 회전속도를 나타낸다.

4. 제어정수 도출

4.1 역기전력 상수

코일 한 턴에 유기되는 역기전력은 식 (4)로부터 식 (5)로 주어진다.

$$V_{emf} = -\frac{d\Psi^{PM}}{dt} = 2\omega_r R_s \Delta_0 l_a \sum_{n=1, odd} B_n \cos(\alpha_y / 2 - \omega_r t) \quad (5)$$

여기서 B_n 는 치슬롯구조로 인한 유효공극길이를 고려하기 위해 도입된 페미언스 계수를 나타낸다. 결과적으로 고정자 이층권선 모두에 유기되는 역기전력은 극수, 턴 수 및 분포권계수를 고려하여 식 (6)으로 정리된다.

$$V_{emf} = 2p\omega_r N_{ips} K_{dn} R_s \Delta_0 l_a \sum_{n=1, odd} B_n \left\{ \cos(\alpha_y / 2 - \omega_r t) + \cos(\alpha_y / 2 - \omega_r t + \pi(mp)) \right\} \quad (6)$$

결과적으로 역기전력 상수는 $V_{emf} = K_E \omega_r$ 로부터 구할 수 있으므로 식 (6)로부터 역기전력 상수 K_E 는 유도된다.

4.2 인덕턴스

A상의 자기 인덕턴스는 식 (4)로부터 $\Psi^{coilA} = L_s i_a$ 에 의해 식 (7)로 표현된다.

$$L_s = 4N_{ipp} R_s \Delta_0 l_a \sum_{n=1, odd} \frac{G_n}{n} \left\{ \cos(n\pi\alpha_y) - 1 \right\} \left\{ \cos\left(\frac{n\pi}{m}\right) + 1 \right\} \quad (7)$$

k번째 상의 여자에 따른 j번째 상의 상호 인덕턴스는 일반화하여 식 (8.a)로 표현할 수 있고, 고정자에 3상권선이 시행된 경우 3상중 한상의 여자에 따른 자극 축으로부터 나머지 두상의 자극 축은 전기각으로 ± 120 도의 위상차를 가지므로, 식 (8.a)에 의해 공극 상호 인덕턴스는 식 (8.b)로 주어진다.

$$M_{jk} = \frac{\Psi_j}{i_k} \Big|_{i=0} \quad (8.a) \quad M = -\frac{1}{2} L_s \quad (8.b)$$

4.3 저항

풍력용 발전기의 경우 비교적 저속 운전을 하므로 AC저항은 DC저항과 같다고 가정하여도 그 오차는 없을 것으로 사료된다. 따라서 영구자석형 풍력용 발전기의 상당저항은 식 (9)로 계산된다 [3].

$$R = \frac{4\rho_c N l_c}{\pi d_c^2} \quad (9)$$

여기서 ρ_c , d_c , N 및 l_c 는 각각 코일의 저항율, 반경 턴 수 및 길이를 나타낸다.

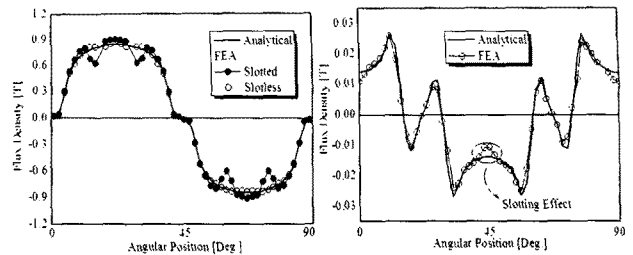
5. 해석결과

5.1 영구자석 및 코일에 의한 자계 및 역기전력

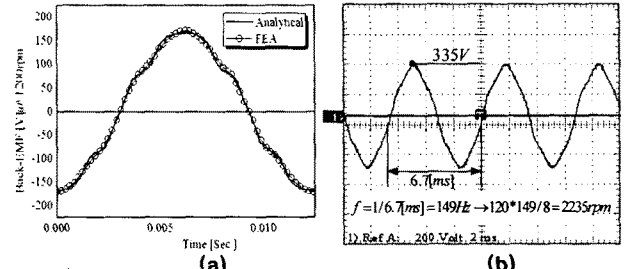
그림 3은 영구자석 및 코일에 의한 자속밀도에 대한 해석적 결과와 유한요소해석결과와의 비교를 보여준다. 해석적 결과는 슬롯팅의 고려 없이 다만 치/슬롯 구조로 인한 유효공극길이만을 고려하였고, 대체로 유한요소 결과와 잘 일치한다. 그림 4는 역기전력 파형에 대한 해석적 결과와 유한요소 해석결과와의 비교 및 측정된 역기전력을 보여준다. 1200rpm에서 해석결과와 유한요소 해석결과는 매우 잘 일치함을 보이며 DC전동기의 속도로 인해 2235rpm에서 측정된 역기전력의 최대 값은 역기전력이 회전속도에 비례한다는 점에 비추어 보아 해석결과와 잘 부합함을 알 수 있다.

5.2 제어정수

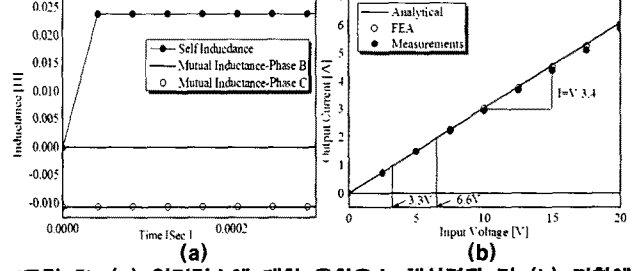
그림 5(a)는 자기 및 상호 인덕턴스에 대한 유한요소 해석결과를 보여주며 표 1은 동기 인덕턴스를 각 요소로 구분하여 실험, 유한요소 및 해석 결과와의 비교를 보여준다. 인덕턴스의 해석 값은 대체로 실험 및 유한요소 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 5 (b)는 권선 인가전압에 따른 전류의 변화 즉 저항에 대한 해석결과, 유한요소 해석결과 및 실험결과를 보여준다. 결론적으로 표 2에 제시된 것과 같이 영구자석형 풍력발전기의 제어정수를 정리할 수 있으며, 해석결과는 실험 및 유한요소 해석에 의해 타당성을 입증 받는다.



(a) 영구자석에 의한 자계 (b) 코일에 의한 자계
〈그림 3〉 해석결과와 유한요소 해석결과와의 비교



(a) 역기전력: (a) 해석 해 및 유한요소 해석결과 (b) 측정
〈그림 4〉 역기전력: (a) 해석 해 및 유한요소 해석결과 (b) 측정



(a) 인덕턴스에 대한 유한요소 해석결과 및 (b) 저항에 대한 실험, 해석적, 유한요소 해석결과와의 비교.

〈표 1〉 인덕턴스에 대한 해석, 유한요소 해석 및 측정결과

Inductance	Self [mH]	End windings [mH]	Mutual [mH]
Methods			
Analytical	25.2	1.7	12.6
FEA	24	unknown	12
Measurements	26		unknown

〈표 2〉 영구자석형 풍력 발전기의 도출된 제어정수

	Analytical	FEA	Experiments
Back-emf constant [V·sec/rad]	1.35	1.35	1.35~1.42
Self-Inductance [mH]	27.2	24	26
Resistance [Ω]	3.42	3.3	3.28

6. 결 론

본 논문은 영구자석형 풍력 발전기의 전자기적 특성해석 및 제어정수 도출에 대하여 기술하였다. 각각의 자계특성식에 의한 해석적 결과는 유한요소 해석결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 다음으로, 도출된 자계특성식을 이용하여 역기전력 및 인덕턴스를 도출하였고 이것들에 대한 해석결과 역시 유한요소해석결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 특히, 역기전력 측정 및 인덕턴스 측정 결과 또한 해석결과의 타당성을 입증하기 위하여 주어졌다.

〈참고 문헌〉

[1] Keld F. Rasmussen, "Analytical Prediction of magnetic Field from Surface Mounted Permanent Magnet Motor," *IEMDC'99*, pp. 34-36, 1999.
 [2] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, PartIV: Fields on load," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 1, pp. 136-142, Jan. 1993.
 [3] Duane Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. The Writer's Collective, 2003.