

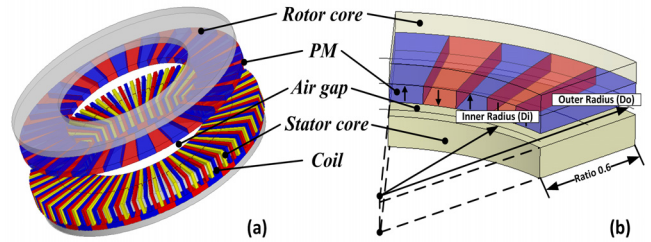
축 자속 영구자석 발전기의 체적에 따른 성능 비교

장석영*, 구민도*, 박유섭*, 최장영*, 이용복**, 윤기갑***
 충남대학교*, 한국과학기술연구원**, 전력연구원***

Performance Comparison of Axial Flux Permanent Magnet Generator according to Volume

Seok-Myeong Jang*, Min-Mo Koo*, Yu-Seop Park*, Jang-Young Choi*, Yong-Bok Lee**
 Chungnam National University*, Korea Institute of Science and Technology**

Abstract - The axial flux machine has higher power density than conventional radial flux machine, so it is widely applied to various industrial area, for instance, low speed wind power generator. For the conventional radial flux machine, 2D finite element method (FEM) is generally applied, but axial flux machine has to employ 3D FEM with long analysis time due to its own structural characteristic. This paper deals with the performance comparison of axial flux machine according to volume.



<그림 1> (a) 해석 모델, (b) 실험 조건 모델

1. 서 론

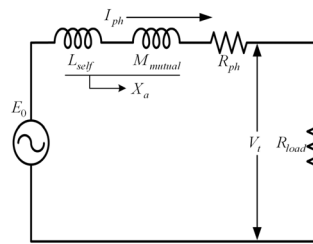
현재 화석연료 고갈과 환경오염 등의 문제로 풍력에 의한 에너지에 관한 관심이 급증하고 있으며, 이를 위한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 저속 풍속 특성을 가지고 있는 지상 풍력의 경우 기존의 반경 방향 자속 영구자석 발전기보다 동일 체적 동일 중량 당 에너지 밀도가 높은 형태인 축 방향 자속 영구자석 발전기가 더욱 적합하다.[1]

축 자속 영구자석 발전기의 회전자는 디스크형의 원판에 영구자석이 부착된 형태로 공극 면이 회전축과 직교하는 형태로 공극 자속 밀도는 발전기의 축과 평행한 방향으로 발생한다. 축 방향 공극 자속밀도로 인하여 고정자 양쪽 측면으로 두 개의 회전자로 구성 할 수 있어 영구자석의 수는 증가되나 도체의 양쪽 측면을 동시에 이용할 수 있어 단축식 발전기의 출력이 2배로 증가 할 수 있다. 영구자석이 부착된 두 개의 회전자는 fan의 역할을 하므로 고정자의 권선에서 발생하는 열의 방출을 용이하게 하여 같은 용량의 권선에 비하여 더 많은 전류를 흘릴 수 있다. 또한 반경 방향 자속 영구자석 발전기와 비교하여 공극의 조절을 통한 출력의 제어가 가능하다. 고정자는 슬롯리스 형태를 채택하여 체적 밀도를 상대적으로 높게 설계 할 수 있으며, 코딩 토크로 인한 손실을 줄일 수 있게 된다. 코어의 체적과 발전기의 중량을 줄임으로 인하여 비용절감의 효과와 소형 경량화를 가능하게 하며, 자기회로의 경로가 짧아 고효율 운전이 가능한 에너지 절약형 전기기기로서 한국형 저속 풍력 발전에 매우 적합하다.

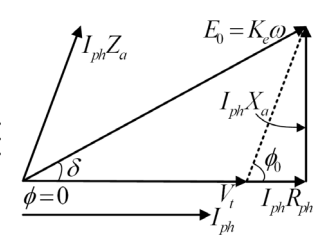
본 논문에서는 축 자속 영구자석 발전기의 성능 비교를 수행하기 위해 유한요소법(FEM)이 사용된다. 유한요소법에는 크게 2D FEM과 3D FEM으로 구분되며 일반적으로 사용되는 반경방향 자속 영구자석 기기는 2D FEM으로도 해석이 가능하지만 축 자속 영구자석 발전기는 구조적 특수성으로 인한 3D FEM이 반드시 적용되어야 하고 이는 발전기의 성능 비교에 있어서 장시간의 해석시간이 필요하여 매우 비실용적이다. 따라서 발전기의 체적에 따른 성능 비교에 있어서 등가회로를 이용하여 정속도에서의 부하에 따른 발전기의 출력 전압, 전류를 산출하여 3D FEM과의 비교를 통해 검증 하였다. 그림 1(a)의 축 자속 영구자석 발전기의 체적에 따른 성능 비교를 수행하기 위해 3D 유한요소법으로 설계한 모델이며 그림 1(b)는 표 1의 해석 모델 사양에 따라 사양 중 발전기의 내반경(Di)과 외반경(Do)의 반경비를 0.6으로 고정된 상태로 사이즈를 증가시켜 축 자속 영구자석 발전기의 동일 출력에서의 체적에 따른 성능 비교를 수행하였다.

<표 1> 해석 모델 사양

| 사 양 | 값 | 사 양 | 값 |
|---------|----------------|-----------|-----------------|
| 극수 | 40 [pole] | 회전자 두께 | 8 [mm] |
| 속도 | 300 [rpm] | 자석 두께 | 7 [mm] |
| 주파수 | 100 [Hz] | 권선수[turn] | 30/21/14/8 |
| 고정자 두께 | 12 [mm] | 공극 | 2.5 [mm] |
| 내반경[mm] | 90/100/120/150 | 외반경[mm] | 150/170/200/250 |



<그림 2> 등가회로



<그림 3> 벡터도

<표 2> 등가회로 파라미터

| 기 호 | 명 칭 | 기 호 | 명 칭 |
|----------|---------|------------|---------|
| k_e | 기전력 상수 | ω | 각 속도 |
| E_0 | 유기기전력 | V_t | 출력 전압 |
| I_{ph} | 상전류 | R_{ph} | 상 저항 |
| ϕ_0 | 내부 상차 각 | δ | 부하 각 |
| ϕ | 역률 각 | R_{load} | 부하 저항 |
| X_a | 동기 리액턴스 | Z_a | 동기 임피던스 |

2. 본 론

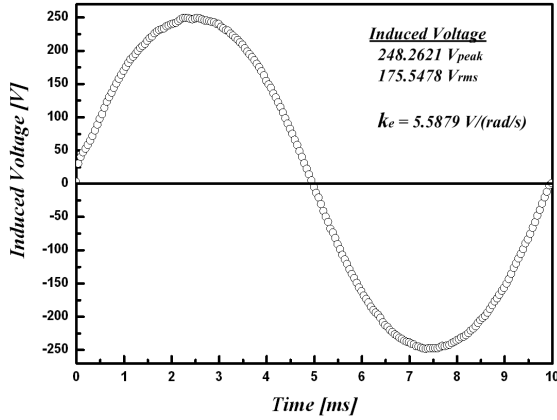
2.1 등가회로

그림 2는 축 자속 영구자석 발전기의 말단에 부하 저항을 연결한 등가회로를 도시한 것이다. 발전기를 정속도 300[rpm]에서 무부하 시험을 통해 유기기전력을 구한 뒤 발전기 내부의 동기 임피던스와 부하에 따른 축 자속 영구자석 발전기의 출력 성능을 도출 할 수 있다. 그림 3은 단위역률을 갖는 축 자속 영구자석 발전기의 벡터도를 나타낸다. 등가회로의 파라미터는 표 2에 나타내었다. 벡터도를 보면 부하의 임피던스를 저항으로 사용하여 역률은 1이 된다. 따라서 역률 각은 0°, 출력 전압의 각이 0°이므로 등가회로의 파라미터의 관계는 식 (1)과 같이 된다. 식 (1)을 사용하여 다음에서 다룰 유기기전력의 크기를 도출한 뒤 출력 전압과 전류를 얻을 수 있다. 등가회로를 사용하여 축 자속 영구자석 발전기에서의 3D 유한요소법과 비교하여 빠른 시간에 부하에 따른 발전기 성능을 도출 할 수 있게 된다.[2]

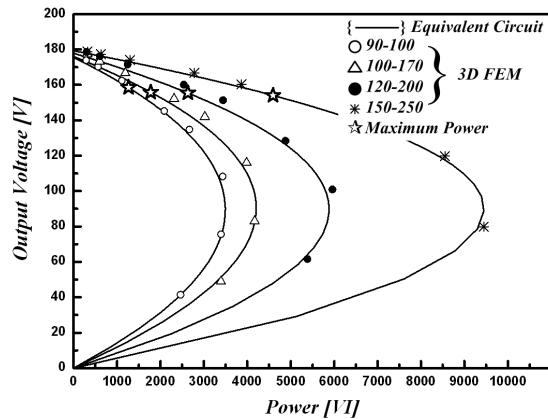
$$E_0 = V_t + I_{ph}R_{ph} + jI_{ph}X_a \quad (1)$$

〈표 3〉 사이즈에 따른 파라미터 사항

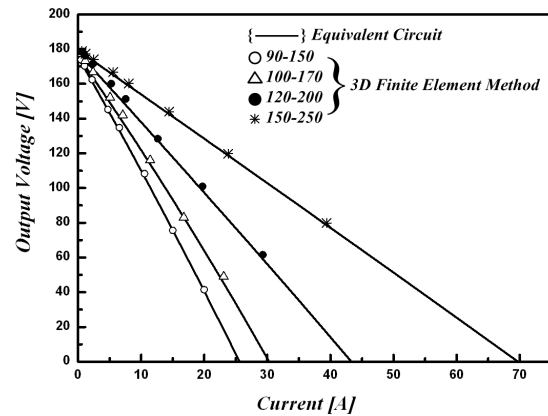
| 내반경-외반경 | 기전력 상수 | 권선수 | 저항 | 인덕턴스 |
|---------|---------------|----------|-----------|-----------|
| 90-150 | 5.59[V/rad/s] | 30[turn] | 6.3653[Ω] | 0.0041[H] |
| 100-170 | 5.60[V/rad/s] | 21[turn] | 5.2431[Ω] | 0.004[H] |
| 120-200 | 5.66[V/rad/s] | 14[turn] | 3.965[Ω] | 0.0017[H] |
| 150-250 | 5.71[V/rad/s] | 8[turn] | 2.533[Ω] | 0.0007[H] |



〈그림 4〉 유기기전력



〈그림 5〉 출력-전압



〈그림 6〉 전류-전압

2.2 발전기 체적에 따른 유기기전력

등가회로를 이용하여 출력 전압과 부하 각을 얻기 위해서는 발전기의 정속도에서의 유기기전력을 구해야 한다. 축 자속 영구자석 발전기의 유기기전력은 $e = -N_s d\Phi/dt$ 이 된다. 유기기전력 식을 보면 유기기전력

은 권선수(N_s), 공극에서의 자속(Φ), 속도(ω_r)와 관련된다. 본 논문에서의 실험 조건에는 반경비를 0.6으로 고정한 뒤 체적의 증가 할수록 자속의 증가에 따라 유기기전력은 증가 하게 된다. 따라서 체적의 증가에서도 같은 기전력 상수($k_e = E_g/\omega_r$)를 얻기 위해 표 3에 나타난 권선수로 조절하여 그림 4와 같이 발전기의 기전력 상수를 5.6(V/rad/s)정도로 유사한 값을 얻게 된다. 발전기에서의 유기기전력을 유사하게 발생되도록 하면 발전기 말단의 부하에 공급될 때 인버터의 입력 전압을 유사하게 유지하여 부하에 효율적인 입력을 공급하여 출력을 얻을 수 있다. 또한 3D FEM에 의해 나타난 유기기전력을 rms로 기전력 상수를 구하며, 출력을 도출 할 때 역시 rms로 해야 한다. 최종적으로 유기기전력을 통해 축 자속 영구자석 발전기의 4종류 사이즈 별 기전력 상수는 표 3에 나타난 것과 같이 거의 유사하게 된다.[3],[4]

2.3 정속도에서의 부하 특성 해석

부하 특성은 정속도에서의 특성을 도출 하였다. 속도 300[rpm]에서의 부하 특성을 등가회로를 사용 하면 식 (2)과 (3)과 같은 전압과 전류와 식 (4)와 같은 출력이 도출 된다. 그림 5와 6은 표 3으로 주어진 값을 통해 각 사이즈의 발전기에서의 출력-전압과 출력전압-전류를 등가회로를 사용한 결과 와 3D FEM을 비교한 결과이다. 그림 5와 6을 보면 체적이 증가할수록 발전기의 최대 출력이 증가하며 동일 출력에서 전압의 값이 다름을 알 수 있다. 유기기전력의 값이 동일한 발전기에서 출력이 증가되는 이유는 표 3에서와 같이 동일 코일 면적에서 기전력 상수를 동일하게 만들기 위해선 코일의 권선수를 조절하기 때문이다. 체적이 증가 할수록 자속은 증가하므로 권선수는 감소해야한다. 따라서 감소 된 권선수에 따라 코일의 저항과 인덕턴스는 감소하기 때문에 정속도에서의 축 자속 영구자석 발전기의 최대 출력은 동일 속도에서 사이즈의 증가에 따라 증가하게 된다. 또한 발전기의 동기 임피던스는 사이즈가 커질수록 작아지므로 이로 인해 그림 6과 같이 전류는 매우 커질 수 있다. 출력-전압의 관계는 전압-전류의 관계에 의해서 포물선과 같은 관계가 형성 된다. 두 출력 전압 중 발전기 설계에 있어선 큰 전압을 갖는 지점을 정격으로 산정한다. 전압이 작을수록 같은 출력에서 전류는 매우 크며 작은 부하 변동에 의해서 전류의 변화 또한 매우 크고 전류밀도가 매우 높아지기 때문에 효율적이지 못한 설계가 되기 때문이다. 따라서 발전기 체적의 증가에 따라 성능을 비교하기 위해 최대 전류밀도를 5A/mm²로 산정하였고 전류밀도를 넘지 않는 최대 출력을 그림 5의 별(☆)로 표시 하였고 150-250 사이즈 모델에서 최대 출력이 가장 크게 된다.[2]

$$V_t = k_e \omega_r \frac{R_{load}}{\sqrt{(R_{ph} + R_{load})^2 + X_a^2}} \tag{2}$$

$$I_{ph} = \frac{k_e \omega_r}{\sqrt{(R_{ph} + R_{load})^2 + X_a^2}} \tag{3}$$

$$P_{out} = 3 V_t I_{ph} \tag{4}$$

3. 결 론

본 논문에서는 단위 체적 당 에너지 밀도가 높아 저속 풍력발전에 유리한 축 자속 영구자석 발전기의 체적에 따른 성능 비교를 수행하였다. 등가회로에 의해 정속도에서의 부하에 따른 발전 특성을 예측하고 유한 요소법과의 비교를 통해 검증하였다. 또한 반경비를 고정시켜 사이즈를 증가시킬 때의 출력의 증가와 전압, 전류의 관계를 비교 했다. 축 자속 영구자석 발전기의 체적 변화에 의한 출력의 증가를 확인하였으며, 안정적인 발전기 운용을 위해 전류밀도를 고려해야 한다. 차후 축 자속 영구자석 발전기의 역할에 따른 성능 비교가 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] 장석명, 박유섭, 고경진, 최장영, 이성호, “자화 패턴에 따른 축 자속형 영구자석 기기의 정특성 해석”, 대한 전기학회 전기기기 및 에너지 변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, pp.57-59, 2010.4.23.-24
 [2] 장석명, 고경진, 조한욱, 오원규, “계자 전류에 따른 40kVA급 고속 동기발전기의 특성 해석”, 대한 전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 춘계학술대회 논문집, pp.59-61, 2007.4.19.-20.
 [3] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, 2009
 [4] Kartik Sitapati and R. Krishnan, “Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent-Magnet, Brushless Machines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, No. 5, pp. 1219-1226, Oct. 2001