

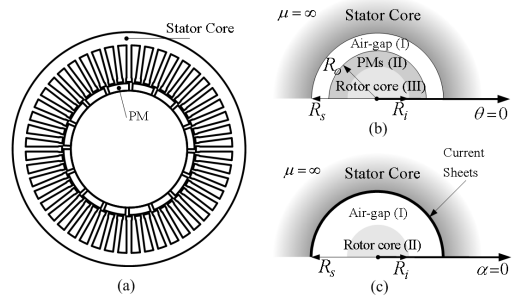
## 스큐를 고려한 다극 영구자석 발전기의 전자기 특성해석/제어정수 도출을 통한 발전특성 예측 및 실험적 검증

장석명\*, **최장영\***, 고경진\*, 박지훈\*, 이성호\*\*, 김일중\*\*\*  
충남대학교\*, 한국생산기술연구원\*\*, 호서대학교\*\*\*

### Experimental Verification and Prediction of Generating Performance of PMG with Multi-Pole Rotor based on Electromagnetic Analysis and Parameter Estimation considering Skew Effects

Seok-Myeong Jang\*, **Jang-Young Choi\***, Kyoung-Jin Ko\*, Ji-Hoon Park\*, Sung-Ho Lee\*\*, li-Jung Kim\*\*\*  
Chungnam Nat'l Univ.\*, KITECH\*\*, Hoseo Univ.\*\*\*

**Abstract** - The analytical expressions for magnetic field distributions considering slotting effects, cogging torque and back-emf considering skew effects are established. On the basis of magnetic field solutions, electrical parameters such as back-emf constant and winding inductance are obtained. The predicted results are validated extensively by non-linear finite element (FE) analyses. In particular, test results such as back-emf, cogging torque, inductance and resistance measurements are given to confirm the analyses. Finally, generating performances are investigated by applying estimated parameters to equivalent circuit (EC) of the permanent magnet generator (PMG) and validated extensively by FE calculations and measurements.



〈그림 1〉 다극 회전자를 갖는 영구자석 발전기의 개념도 및 해석모델.

$$B_n = \sum_{n=1, odd} np\mu_0 \left( R_s^{2np} r^{-np-1} + r^{(np-1)} \right) \square$$

$$\left[ \frac{\{ (np - \mu_{rs})(YM_{\theta n} - XM_m) + (1 - np\mu_{rs})(YM_m - XM_{\theta n}) \}}{2\{ (np)^2 - 1 \} \left\{ \mu_{rs} (R_s^{2np} - R_i^{2np}) + (R_s^{2np} + R_i^{2np}) \right\}} \right] \quad (3)$$

$$B_{cn} = \frac{\mu_0 I_n \left\{ (\mu_{rs} + 1) r^{np-1} + (\mu_{rs} - 1) r^{-np-1} R_i^{2np} \right\}}{(\mu_{rs} + 1) R_s^{np-1} - (\mu_{rs} - 1) R_s^{-np-1} R_i^{2np}} \quad (4)$$

여기서  $\mu_0$  및  $\mu_{rs}$ 는 각각 공기의 투자율 및 회전자 철심의 비투자율이고  $I_n$ 은 전류밀도 푸리에 계수이며,  $M_{\theta n}$  및  $M_m$ 은 각각 영구자석 자화의 원주방향 및 반경방향 푸리에 계수이다. X 및 Y는 식 (5)로 주어진다.

$$X = 2R_i^{np+1} - R_i^{2np} R_o^{-np+1} - R_o^{np+1}, \quad Y = R_i^{2np} R_o^{-np+1} - R_o^{np+1} \quad (5)$$

한편, 그림 1의 해석모델에서 고정자 구조는 슬롯리스 모델이라 가정되었기 때문에 본 논문은 슬롯팅 고려를 위한 2-d 퍼미언스 함수를 [1]로부터 도입하였다.

$$\lambda(r, \alpha) = \sum_{\mu=0,1,2,\dots} \Lambda_\mu(r) \cos \mu Q_s (\alpha + \alpha_{sa}) \quad (6)$$

여기서  $Q_s$ 는 슬롯수,  $\alpha_{sa}$ 는 권선 피치에 의해 결정되는 상수이며  $\Lambda_\mu(r)$ 은 [1]에 자세히 주어졌다. 식 (6)을 사용하여 슬롯팅효과를 고려할 수는 있지만, 스큐를 고려하기 위해서는 식 (6)은 [2]로부터 식 (7)로 수정될 수 있다.

$$\lambda^{skew}(r, \alpha) = \Lambda_0 + \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{\sin(\mu Q_s \varepsilon / 2)}{\mu Q_s \varepsilon / 2} \Lambda_\mu(r) \cos \mu Q_s (\alpha + \alpha_{sa}) \quad (7)$$

$\Lambda_0$ 는 (6)에서  $u=0$ 인 경우의 2-d 퍼미언스 함수의 평균값이며  $\varepsilon=2S_k\pi/Q_s$ , 여기서  $S_k$ 는 스큐비를 나타낸다. 결론적으로, 스큐 및 슬롯팅 효과가 고려된 무부하시 및 전기자 반작용 자계는 식 (8)로 표현된다.

$$B_{m\_slotted}^I(r, \theta) = B_m^I(r, \theta) \lambda^{skew}(r, \alpha) \quad (8.a)$$

$$B_{cn\_slotted}^I(r, \alpha) = B_{cn}^I(r, \alpha) \lambda^{skew}(r, \alpha) \quad (8.b)$$

다음으로 코깅토크는 식 (9)로부터 구할 수 있다 [3].

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

여기서  $W(\theta)_{air-gap}$ 은 공극내의 자기에너지이며 식 (10)으로 주어진다.

### 1. 서 론

본 논문은 스큐를 고려한 다극영구자석 발전기의 전자기 특성해석 및 제어정수 도출을 통한 발전특성 예측 및 실험적 검증에 대해 다룬다. 우선, 슬롯팅이 고려된 무부하 자계 분포 및 전기자 반작용 자계, 스큐가 고려된 역기전력 및 코깅토크에 대한 해석해가 유도되어졌다. 다음으로 유도된 자계에 대한 해석해로부터 역기전력 상수 및 인덕턴스와 같은 회로정수에 대한 해석해 역시 유도되었다. 해석해를 사용하여 예측된 영구자석 발전기의 전자기 특성해석결과는 비선형 유한요소해석결과 및 실험결과와 비교하여 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 마지막으로 도출된 회로정수를 영구자석 발전기 등가회로에 대입하여 발전특성을 예측하였으며, 예측된 발전특성 역시 실험 및 유한요소해석결과와 비교되어졌다.

### 2. 본 론

#### 2.1 해석모델

그림 1은 다극 회전자를 갖는 영구자석 발전기의 개념도 및 해석모델이다. 해석에 사용된 발전기의 극수는 16극 이며, 그림 1 (b) 및 (c) 무부하 자계분포 및 전기자 반작용 자계를 위한 해석 모델의 해석모델은 다음의 가정으로부터 단순화 되어졌다. i) 영구자석, 고정자 코어 및 회전자 철심의 투자율은 각각 공기와 같고, 무한이며, 상수이다. ii) 고정자 코어는 슬롯리스 형태이다.

#### 2.2 전자기적 특성식

무부하시자계분포 및 전기자 반작용 자계분포의 예측을 위해 본 논문은 2차원 극좌표계와 자기 벡터 자위를 이용하여 이들에 대한 해석해를 유도하였다. 해석해의 유도를 위해서는 맥스웰방정식으로 부터 각 영역에 대한 지배방정식을 유도하여야 하며 지배방정식의 해에 대한 미정계수를 구하기 위해서는 적절한 경계조건이 필요하다. 이러한 과정에 대한 서술은 다소 길기 때문에 본 논문에서는 식 (1)과 (2)로 주어지는 무부하시 자계 분포에 대한 해석해 ( $B_m^I$ )와 전기자 반작용자계 분포에 대한 해석해 ( $B_{cn}^I$ )에 대한 결과 식만을 제시하고자 한다.

$$B_m^I = \sum_{n=1, odd} B_n \cos(np\theta) \quad (1)$$

$$B_{cn}^I = - \sum_{n=1, odd} B_{cn} \square$$

$$\left[ i_a \sin(np\alpha) + i_b \sin \left\{ np \left( \alpha - \frac{2\pi}{3p} \right) \right\} + i_c \sin \left\{ np \left( \alpha - \frac{4\pi}{3p} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

여기서 n과 p는 각각 고조파 차수 및 극쌍수 이며,  $\alpha$  및  $\theta$ 는 각각 고정자 및 회전자 기준각을 나타낸다.  $i_a, i_b$  및  $i_c$ 는 각각 a상, b상 및 c상의 전류이고,  $B_n$  및  $B_{cn}$ 은 각각 식 (3)과 (4)로 주어진다.

$$W(\theta)_{air-gap} = \frac{1}{2\mu_0} \int \{B'_{r,slotted}(r, \theta)\}^2 dV \quad (10)$$

### 2.3 회로정수 도출

본 논문은 2.2절에서 이미 무부하시 자계 및 전기자 반작용 자계에 대한 해석해를 유도했기 때문에 각각으로부터 영구자석 및 전기자 권선 전류에 의한 쇄교자속을 구할 수 있으며, 식 (11)과 식 (12)로 각각 주어진다.

$$\Psi_{PM} = N\Lambda_0 \int_{-\delta_y/2}^{\delta_y/2} B'_m(R_s, \alpha, t) R_s l_a d\alpha$$

$$= 2 \frac{N\Lambda_0 R_s l_a}{p} \sum_{n=1, odd} \frac{B_n}{n} \sin\left(np \frac{\alpha_y}{2}\right) \cos(np\omega_r t) \quad (11)$$

$$\Psi_{coil} = N\Lambda_0 \int_{-\delta_y/2}^{\delta_y/2} B'_{cn}(R_s, \alpha) R_s l_a d\alpha = 2 \frac{N\Lambda_0 R_s l_a}{p} \sum_{n=1, odd} \frac{B_{cn}}{n} \cos\left(np \frac{\alpha_y}{2}\right) \quad (12)$$

여기서 N은 상당 턴 수이고  $\delta_y$  및  $l_a$ 는 각각 권선 피치 각 및 기기의 유효 축방향 길이이다.  $\omega_r$ 은 회전속도를 나타내며 단위는 [rad/s]로 주어진다. 최종적으로 식 (11) 및 (12)로부터 각각 역기전력 및 인덕턴스를 유도할 수 있으며, 그 에 대한 해석하는 식 (13)과 (14)로 각각 주어진다.

$$V_{emf} = -\frac{d\Psi_{PM}}{dt} = 2\omega_r N\Lambda_0 R_s l_a \sum_{n=1, odd} B_n S_n \sin\left(np \frac{\alpha_y}{2}\right) \sin(np\omega_r t) \quad (13)$$

$$L_s = 2 \frac{N\Lambda_0 R_s l_a}{p} \sum_{n=1, odd} \frac{B_{cn}}{i_a n} \cos\left(np \frac{\alpha_y}{2}\right) \quad (14)$$

여기서  $S_n$ 은 스큐를 고려하기 위해 도입된 계수이다.

### 2.4 등가회로

그림 2는 영구자석 발전기의 한상 등가회로를 보여 주며 2.3절에서 도출한 해석해와 연동하여 발전기의 발전특성을 해석 할 수 있다. 그림 3은 실제 제작된 영구자석 발전기의 회전자 및 고정자와 발전특성 실험 장치 구성을 보여준다.

### 2.5 해석결과

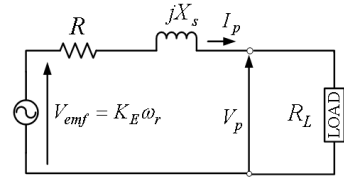
그림 4는 영구자석 발전기의 전자기적 특성 및 발전특성을 전자기적 해석해, 유한요소법 및 실험에 의해 도출한 결과를 보여주며, 해석해로부터 얻어진 결과는 유한요소 및 실험에 의한 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 특히, 스큐에 따른 코깅토크 및 역기전력 파형의 변화를 해석해를 사용하여 실험결과와 유사하게 도출함으로써, 본 논문에서 제시한 전자기적 해석해는 좀 더 정확하고 빠른 발전특성 해석 및 발전기 설계를 가능하게 해줄 것으로 사료된다.

## 3. 결 론

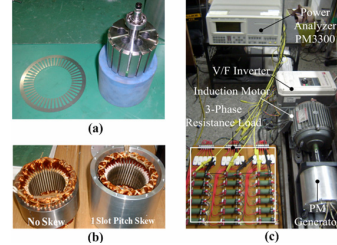
본 논문은 스큐를 고려한 다극영구자석 발전기의 전자기 특성해석 및 제어정수 도출을 통한 발전특성 예측 및 실험적 검증에 대해 다루었다. 전자기적 해석해를 사용하여 예측된 영구자석 발전기의 전자기 특성 해석결과는 비선형 유한요소해석결과 및 실험결과와 비교하여 잘 일치함을 확인할 수 있었고, 마지막으로 도출된 회로정수를 영구자석 발전기 등가회로에 대입하여 발전특성을 예측하였으며, 예측된 발전특성 역시 실험 및 유한요소해석결과와 잘 부합함을 확인하였다.

### [참고 문헌]

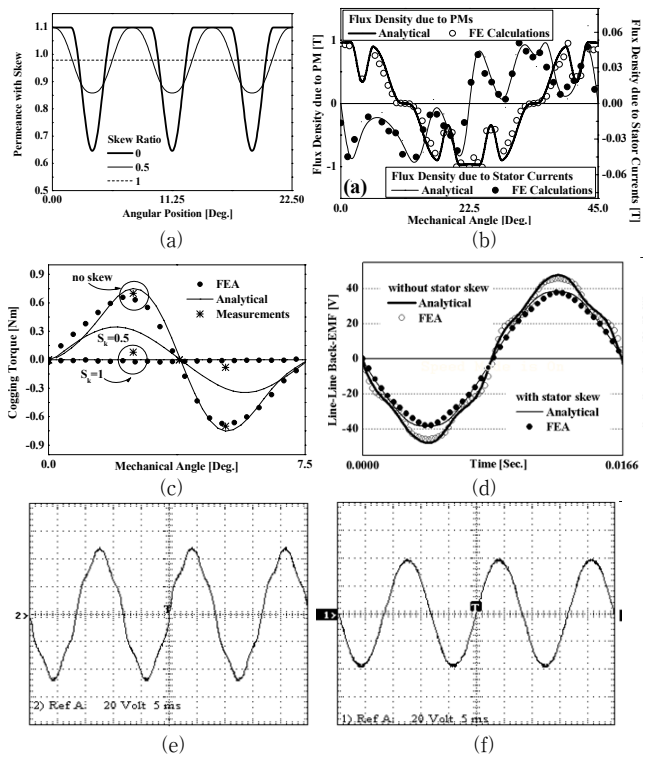
- [1] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dcmotors, PartIII: Effect of Stator Slotting," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, no. 1, pp. 143-151, Jan. 1993.
- [2] Kwang-Heon Kim, Dong-Joon Sim and Jong-Soo Won, "Analysis of skew effects on cogging torque BEMF for BLDCM," *IEEE Industry Applications Conference*, vol.1, pp. 191-197, Oct. 1991.
- [3] C. Breton, J. Bartolome, J. A. Benito, G. Tassinario, I. Flotats, C. W. Lu and B. J. Chalmers, "Influence of Machine Symmetry on Reduction of Cogging Torque in Permanent-Magnet Brushless Motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3819-3823, Sept. 2000.



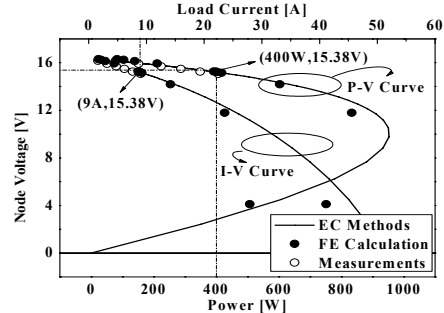
<그림 2> 영구자석 발전기 한상 등가회로.



<그림 3> (a) 제작된 영구자석 회전자, (b) 제작된 스큐 유무에 따른 고정자 및 (c) 발전특성 실험 장치.



<그림 4> 해석 및 실험결과 : (a) 스큐비에 따른 고정자 표면에서의 퍼미언스 분포, (b) 무부하 및 전기자 반작용 자계 분포, (c) 스큐비에 따른 코깅토크, (d) 스큐 유무에 따른 역기전력 해석결과, (e) 스큐 없는 경우 역기전력 실험파형 및 (f) 스큐있는 경우 역기전력 실험파형.



<그림 5> 다극 회전자를 갖는 영구자석 발전기의 개념도 및 해석모델.