

등가 자기회로법을 이용한 Claw-pole type generator의 특성해석

정재우, 권순오, 이상호, 홍정표
창원대학교

An Application of Equivalent Magnetic Circuit method to the analysis of Claw-pole type generator

Jae-woo Jung, Soon-O Kwon, Sang-Ho Lee, Jung-Pyo Hong
Changwon National University

Abstract - Magnetic field analysis of claw-pole type generator using equivalent circuit is presented in this paper. On the basis of 3D geometry and flux paths, equivalent magnetic circuit is designed and field analysis is performed by solving the circuit. Non-linear characteristic of material is considered for precise analysis results. 3D FEA is performed to verify analysis results, and flux densities in rotor and stator regions are compared. Calculated no-load back emf for field input voltage and speed are verified by experiment. Comparing to 3D FEA, presented method provides precise results with instant calculation time.

1. 서 론

Claw-pole type generator는 강건한 구조와 간단한 제작 과정으로 인해 현재 거의 모든 자동차에서 발전기로 사용되고 있다. 그러나 독특한 극의 형상으로 인해 높은 자속의 포화와 누설이 존재한다. 이러한 특성은 적층 구조의 일반적인 전동기와는 달리 회전자 구조로 제작되고, 그 형상이 축방향으로 대칭적이지 않음으로 인해 나타나며, 3차원적인 자계분포가 기기 전반에 나타난다. 따라서 3차원 유한요소 해석이 정확한 형상을 고려함으로써 정확한 자계 해석에 직접적으로 적용 될 수 있다. 그러나 3차원 유한요소 해석은 많은 요소수로 인한 해석 시간과 메모리를 필요로 한다. 따라서 Claw-pole type 발전기와 같은 3차원적인 자계분포를 갖는 기기의 초기 설계 단계에서 3차원 유한요소 해석은 효과적이지 않다.

3차원자계 분포를 해석 하는 다른 방법에는 해석 모델의 자기저항을 등가화 하여 자기회로를 이용하는 등가자기회로법이 있으며 다양한 기기에 적용 되었다[1]-[3]. 등가자기 회로법을 이용하여 3차원 유한요소 해석에 비해 간단한 모델링으로 정확한 해석 결과를 빠른 시간 내에 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 등가 자기회로법을 Claw-pole type 발전기의 특성 해석에 적용하였고, 그 신뢰성을 검증 하였다.

해석 대상 모델의 등가 자기회로 설계를 위해서는 주 자로(main flux path) 및 누설 자속의 자로가 파악 되어야 하며, 본 논문에서는 3차원 유한요소 해석을 통해 주 자로를 파악하고, 자기회로를 간략히 하기위하여 여러 가지 누설 자속 성분 중 영향이 비교적 큰 누설 자속 성분만 고려하였다. 주 자로와 누설 자속의 자로를 고려하여 회전자, 공극, 고정자의 등가 퍼미언스, 회전자 및 고정자의 기자력으로 구성된 등가 자기회로를 설계 하였다. 등가 자기회로의 모든 절점에서 KCL(Kirichoff's Current Law)을 적용하여 각 절점에서의 방정식을 세우

고, 방정식을 퍼미언스와 자기 포텐셜, 전원으로 구성된 행렬로 나타내었다. 이 행렬의 미지수인 각 절점에서의 자기 포텐셜을 구함으로써, 등가 자기회로의 각 요소에서의 자속 밀도와 자속량을 계산하였다.

해석 방법의 신뢰성 검증을 위하여 3차원 유한요소 해석결과와 실험결과를 등가 자기회로법을 이용한 해석결과와 비교하였다. 각 요소의 자속 밀도를 3차원 유한요소 해석과 비교하였고 계자 입력 전압과 회전 속도에 따른 무부하 역기전력을 실험치와 비교하였다.

많은 해석시간을 필요로 하는 3차원 유한요소 해석에 비하여 등가 자기회로법은 아주 짧은 시간 내에 만족할 만한 정밀도의 해석 결과를 얻을 수 있으므로 등가 자기회로법을 이용한 3차원 자계 해석은 초기설계에 아주 유용하게 적용될 수 있다.

2. 등가 자기회로의 설계

2.1 해석 대상

그림 1에 일반적인 claw-pole type 발전기의 구조를 나타내었다. 해석 대상모델은 3kW출력으로서 16극의 회전자와 96슬롯의 적층구조의 고정자를 가지며 그림 1의 2중 구조이다. 회전자에는 계자 코일이 감겨져 있고 브러시를 통하여 직류 전원이 인가된다. 주조로 제작된 회전자는 적층 구조에 비해 강건하고 제작 과정이 간단하다. 이러한 특성은 자동차용 발전기와 같은 대량생산의 적용에 적합하다. 그러나 회전자의 구조가 축 방향으로 대칭적이지 않으므로 3차원적인 자계 분포를 가지므로 설계를 위한 해석에 어려움이 있다.

2.2 3차원 유한요소 해석

등가 자기회로의 설계에 앞서 3차원 유한요소 해석을 통해 주 자로 및 누설 자로를 파악하고, 영향이 적은 누설 자로는 해석의 편의를 위해 생략하였다. 3차원 유한요소 해석은 상용 프로그램인 Flux-3D를 사용 하였고, 해석 모델은 대칭성과 주기성에 의해 1/16 모델링 하였다. 그림 2는 3차원 유한요소 해석 결과로서 자속 밀도 분포와 자속 벡터를 나타내었다.

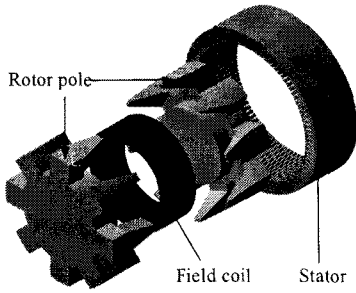


그림 1. Claw-pole type 발전기의 일반적인 구조



그림 2. 3차원 자속 밀도 및 자속 벡터

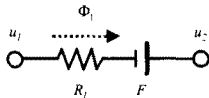


그림 3. 등가 자기회로의 구성 요소

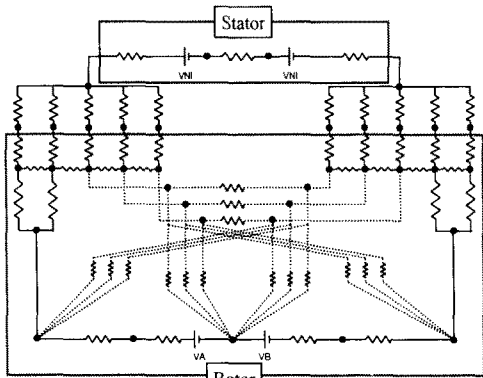


그림 4. Claw-pole type generator의 등가 자기회로

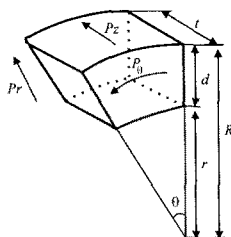


그림 5. 원통좌표계에서의 3 퍼미언스 성분

2.3 등가 자기회로의 기본 이론

그림 3에 등가 자기회로의 구성 요소를 나타내었다. 여기서, u_i , u_o , Φ_l , R_l , F_l 은 각각 절점에서의 자기 포텐셜, 자속, 자기저항, 기자력을 각각 나타낸다. 등가 자기회로의 각 절점에서 전압 방정식이 적용되고 (1)의 행렬을 구성한다. (1)에서 P 는 퍼미언스, U 는 절점의 자기 포텐셜, F 는 기자력을 나타낸다.

$$[P]\{U\} = \{F\} \quad (1)$$

해석 대상 모델의 등가 자기회로는 그림 4와 같고, VA와 VB는 각각 계자 기자력의 1/2 이며, VNI 전기자 반작용 기자력이다. 회로에서 실선은 철심을 통한 자로를, 점선은 공기를 통한 자로를 각각 나타낸다. 그림의 자기회로는 3차원 해석 모델과 대응되는 1/16 모델이다.

2.4 등가 퍼미언스의 계산

회전형 전동기의 형상 치수는 원통 좌표계에서 편리하게 표현되며 퍼미언스 또한 원통좌표계에서 표현이 용이하다. 그림 5는 본 논문에 적용된 원통형 요소에서 각 방향 퍼미언스 성분을 나타내었으며 (2) - (4)을 이용하여 각각의 퍼미언스를 산정하였다.

$$P_r = \frac{\mu \cdot S_r}{l_r} = \frac{\mu \cdot t \theta}{\log_e(1+d/r)} \quad (2)$$

$$P_\theta = \frac{\mu \cdot S_\theta}{l_\theta} = \frac{\mu \cdot t}{\theta} \cdot \log_e(1+d/r) \quad (3)$$

$$P_z = \frac{\mu \cdot S_z}{l_z} = \frac{\mu \cdot \theta}{2} \cdot (R^2 - r^2) \quad (4)$$

A. 공극의 퍼미언스

다른 영역의 퍼미언스와는 달리 치와 슬롯의 구조로 인해 공극의 퍼미언스는 산정이 어렵다. 치와 슬롯을 고려한 공극의 퍼미언스 산정을 위해서 공극의 퍼미언스는 치를 포함하는 공극의 퍼미언스 (P1)과 슬롯을 포함하는 공극의 퍼미언스 (P2)로 나눈 후 두 퍼미언스의 직렬 연결로 (7) 과 같이 나타내었다. 공극의 두 퍼미언스 성분은 그림 6에 나타낸 바와 같고, b_o , g , r 은 각각 슬롯 폭, 공극의 길이, 슬롯 폭의 1/2를 최대 값으로 갖고 0을 최소값으로 갖는 원호의 반경이다.

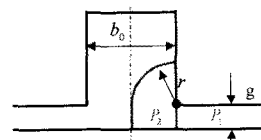


그림 6. 공극의 퍼미언스

$$P_1 = \frac{\mu_o(\tau_s - b_o)l_e}{g} \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{2\mu_o}{\pi} \int_0^{b_o/2} \frac{l_e dr}{2g/\pi + r} = \frac{2\mu_o l_e}{\pi} \cdot \log_e \left[\frac{g + \pi b_o/4}{g} \right] \quad (6)$$

$$P_g = P_1 + 2P_2 = \mu_o l_e \left(\frac{\tau_s - b_o}{g} + \frac{4}{\pi} \cdot \log_e \left[1 + \frac{\pi \cdot b_o}{4g} \right] \right) \quad (7)$$

B. 누설자속

해석 대상이 높은 자속포화를 갖기 때문에 누설 자속의 고려는 정확한 해석 결과를 위해 필수적이다. 누설을 고려하기위해서 주요 누설 성분이 선택되었고, 자로의 단면 형상과 길이는 개략적으로 선정하였다. 본 논문에서 고려된 누설자로는 그림 6과 같다.

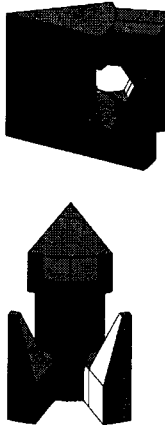


그림 7. 누설 자속

3. 등가 자기회로의 계산

(1)의 행렬을 계산함으로써 미지수인 각 절점에서의 자기 포텐셜이 산정되면, 퍼미언스와 포텐셜을 이용하여 요소의 자속량을 산정한다. 자속 밀도는 자속량과 요소의 단면적으로 산정 하였다. 무부하 역기전력은 산정된 자속량이 회전자 위치에 따라 정현적으로 변한다는 가정으로 자속량의 시간 변화율을 이용하여 계산하였다.

4. 해석방법의 신뢰성 검증

4.1 요소의 자속 밀도

등가 자기회로를 이용한 Claw-pole type 발전기의 해석 결과를 검증하기 위해 3차원 유한요소로부터 얻은 각 영역의 자속 밀도가 비교되었다. 공극, 회전자 표면, 고정자 치에서의 자속 밀도를 표 1에서 비교하였다. 3차원 유한요소 해석에 비하여 자속 밀도값에 오차는 있지만, 요소의 자속 포화양상을 확인하기에는 충분하다. 보다 높은 정밀도의 해석 결과는 각각의 영역을 보다 많은 수의 요소로 나누어 줌으로써 얻을 수 있다.

Table 1 주요 위치에서 자속 밀도 비교

Element Number	Description	B (T)	
		3D FEA	등가자기회로법
2	Rotor surface	0.248	0.210
10	Air gap	0.165	0.1790
14	Stator teeth	0.360	0.3406

4.2. 무부하 역기전력

무부하 역기전력이 계자 입력 전압과 회전 속도에 따라 측정 되었고 등가 자기회로를 이용한 역기전력과 그림 7에서 비교 되었다.

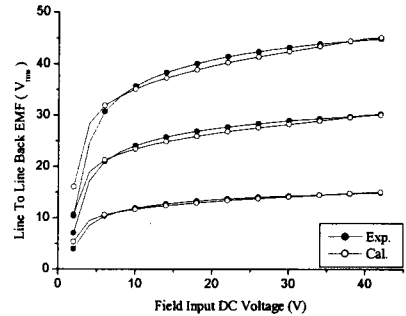


그림 8. 속도와 계자전압에 따른 역기전력

5. 결 론

본 논문에서는 등가 자기회로법을 이용한 Claw-pole type 발전기의 자체해석을 수행하였다. 재질의 비선형적인 특성이 고려되었으며, 3차원 유한요소 해석과 실험치와의 비교를 통해 해석 방법의 신뢰성 검증을 하였다.

등가 자기회로법은 높은 해석의 정밀도와 빠른 해석 시간으로 Claw-pole type 발전기의 설계를 위한 해석에 효과적으로 적용될 수 있다.

Acknowledgements

This work was partially supported by MOCIE through IERC and K-MEM R&D Cluster.

[참 고 문 헌]

- [1] 염상부, 하경호, 홍정표, 김규탁, "3D EMCN을 이용한 양축식 가동 코일형 LDM의 특성 해석", 학계학술대회 논문집, 876~878, 2000
- [2] Jin Hur, Dong-Seok Hyun, Jung-Pyo Hong, " A Method for Reduction of Cogging Torque in Brushless D.C. Motor Considering the Distribution of Magnetization by 3-D EMCN", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34, No. 5, pp. 3532~3533, 2004
- [3] Gyu-Hong Kang, Jin Hur, Byoung-Kuk Lee, Jung-Pyo Hong, "Force Characteristic Analysis of PMLSMs for Magnetic Levitation Stage based on 3-Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network", *IEEE on industrial application society 2004*, vol. PS-7, no.1, pp.65-72, 2004.