

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 회전자와 주자로 제작되고, 그 형상이 축방향으로 대칭적이지 않음으로 인해 나타나며, 3차원적인 자계분포가 기기 전반에 나타난다. 따라서 3차원 유한요소 해석이 정확한 형상을 고려함으로써 정확한 자계 해석에 직접적으로 적용될 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 등가 자기회로법이 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 주자로(main flux path) 및 누설 자속의 자로가 파악되어야 하며, 본 논문에서는 3차원 유한요소 해석을 통해 주자로를 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 3kW출력으로 16극의 회전자와 96슬롯의 적층구조의 고정자를 가지며 그림 1의 2중 구조이다. 회전자에는 계자 코일이 감겨져 있고 브러쉬를 통하여 직류 전원이 인가된다. 주자로 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.

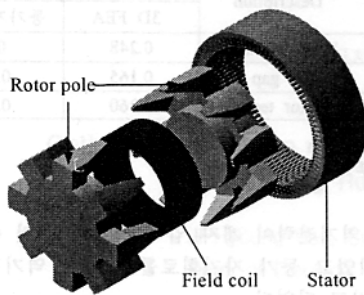


그림 1. Claw-pole type 발전기의 일반적인 구조



그림 2. 3차원 자속 밀도 및 자속 벡터

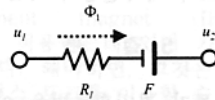


그림 3. 등가 자기회로의 구성 요소

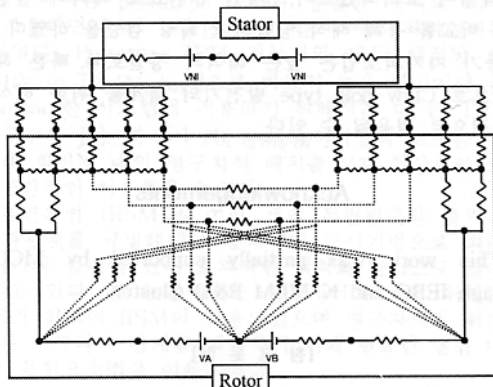


그림 4. Claw-pole type generator의 등가 자기회로

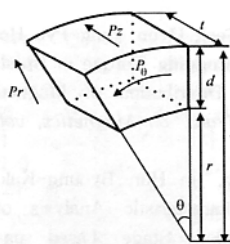


그림 5. 원통좌표계에서의 3 퍼미언스 성분

2.3 등가 자기회로법의 기본 이론

그림 3에 등가 자기회로의 구성 요소를 나타내었다. 여기서, u_1 , u_2 , Φ_f , R_f , F 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_0 , g , r 은 각각 슬롯 폭, 공극의 길이, 슬롯 폭의 1/2를 최대 값으로 갖고 0을 최소값으로 갖는 원호의 반경이다.

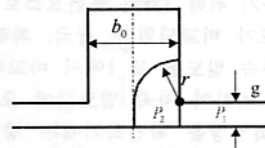


그림 6. 공극의 퍼미언스

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

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

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

B. 누설자속

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

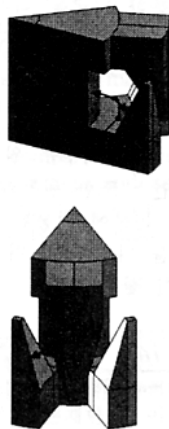


그림 7. 누설 자속

3. 등가 자기회로의 계산

(1)의 행렬을 계산함으로써 미지수인 각 절점에서 자기 포텐셜이 산정되면, 퍼미언스와 포텐셜을 이용하여 요소의 자속량을 산정한다. 자속 밀도는 자속량과 요소의 단면적으로 산정 하였다. 무부하 역기전력은 산정된 자속량이 회전자 위치에서 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.

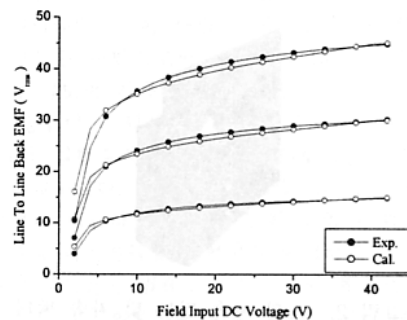


그림 8. 속도와 계자전압에 따른 역기전력

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 양측식 가동 코일형 LDM의 특성 해석", 하계학술대회 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.

대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 2005년도 춘계학술대회 논문집

Proceedings of the KIEE EMECS Spring Annual Conference 2005

- ◆ 일 시 : 2005년 4월 28일(목) ~ 4월 30일(토)
- ◆ 장 소 : 한국기계연구원(대전 대덕연구단지)
- ◆ 발표분야 : 전기기기, 전력전자, 신교통시스템,
대체에너지시스템 등 관련분야



주최 : 사단법인 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회

주관 : 한국기계연구원

후원 : (주)Rotem • 한국전기연구원 • 전자부품연구원
한국철도기술연구원 • 한국에너지기술연구원
전기기기산업 인력양성센터(HCEM)

2005 KIEE

(EMP 14)	그래픽 언어를 이용한 BLDC모터 제어에 관한 연구	
16:00~17:30	..... 이동현, 홍선기	70
(EMP 15)	2방향 자계인가형 싱글 시트 테스터	
16:00~17:30	..... 김홍정, 고창섭, 홍선기, 신판석, Koji Fujiwara	73
(EMP 16)	출력 특성을 고려한 단상 자기여자 유도 발전기의 특성 해석	
16:00~17:30	..... 김철진, 이관용, 조영래, 백수현	76
(EMP 17)	LIM을 이용한 전자기 펌프의 특성해석	
16:00~17:30	..... 차재걸, 전문호, 이종웅, 김창업	80
(EMP 18)	유압펌프용 SRM 구동 시스템의 특성해석	
16:00~17:30	..... 이주현, 김봉철, 김태형, 안진우	83
(EMP 19)	3차 권선을 이용한 자속구속형 사고전류제한기의 특성	
16:00~17:30	..... 조용선, 박형민, 박충렬, 임성훈, 최효상	87
(EMP 20)	Magnetic Fluid Linear Pump 관내의 자성유체 형상에 관한 연구	
16:00~17:30	..... 성일권, 서 강, 박관수	90
(EMP 21)	케이블 변압기용 케이블의 반도체층 최적화에 관한 연구	
16:00~17:30	..... 배병현, 우장수, 김현일, 한정호, 권무삼, 권영안	93
(EMP 22)	2상 선형 하이브리드 스텝핑 전동기의 코킹 리플 저감	
6:00~17:30	..... 황태식, 석줄기	96
(EMP 23)	가동 1차측 LSRM의 위치 검출각에 따른 운전 특성	
16:00~17:30	..... 장석명, 박지훈, 유대준, 조한욱, 최장영	99
(EMP 24)	Skew에 따른 PMLSM의 자계특성 해석	
16:00~17:30	..... 장석명, 서정출, 유대준, 최장영, 조한욱	102
(EMP 25)	50kW 급 초고속 브러시리스 DC 전동기의 설계	
16:00~17:30	..... 최상규, 조한욱, 최장영, 박지훈, 함상용, 장석명	105
(EMP 26)	유한요소법을 이용한 배전용 PAD변압기 권선고장시의 전자계해석	
16:00~17:30	..... 하정우, 김 철, 김한들, 신판석, 이병성, 한상욱	108
(EMP 27)	누설자속을 이용한 지하가스관 외부 금속물체의 자기신호 해석	
16:00~17:30	..... 김 철, 하정우, 김한들, 신판석, 박관수	111
(EMP 28)	유한요소법과 SUMT를 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 용량에 따른 회전자 최적 설계	
16:00~17:30	..... 권선범, 이중호	114
(EMP 29)	반응표면방법론을 적용한 슬롯 수에 따른 동기형 릴럭턴스 전동기의 최적 설계	
16:00~17:30	..... 박성준, 이중호	117
(EMP 30)	등가 자기회로법을 이용한 Claw-pole type generator의 특성해석	
16:00~17:30	..... 정재우, 권순오, 이상호, 홍정표	120