

분리형 슬롯구조를 지니는 디스크형 발전기의 특성 해석

\*김재광, \*조동혁, \*정현교, \*\*이철균  
\*서울대학교 전기공학부, \*\*동의대학교 전기공학과

Characteristic Analysis of Disk Type Generator with Separated Slots

\*Jae-kwang Kim, \*Dong-Hyeok Cho, \*Hyun-Kyo Jung, \*\*Cheol-Gyun Lee  
\*School of Electrical Engineering, Seoul National University, \*\*Dong-Eui University

**Abstract** - 근래 들어 소용량의 디스크형 발전기(disk type generator)가 여러 분야에서 이용되면서 기존 모델보다 개선된 특성을 나타내는 새로운 구조에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 분리형 슬롯 구조를 지니는 디스크형 발전기를 제안하였고 그 특성을 해석하여 기존 모델과 비교함으로써 우수성을 입증하였다.

제안된 모델의 3차원 자계 해석을 위해서 체적적분방정식법(VIEM)을 이용하였다. 전기자와 계자의 상대 위치에 따른 자속 밀도 분포와 직렬 코일 내부의 총 자속량을 체적적분방정식법을 통하여 정확하게 계산하고 여기서 구해진 자속량에 대한 몇가지 후처리 과정을 통해서 발전기의 주요 특성들을 구했다. 이 결과를 동일한 설계 제한 사항을 고려한 기존 모델의 결과와 비교하여 제안된 구조를 지니는 디스크형 발전기의 우수성을 입증하였고 실제 설계에도 활용이 가능하도록 했다

이 코일에 흐르는 자계  $\vec{H}_c$ 와 자성체에 유기된 자계  $\vec{H}_m$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{H} = \vec{H}_c + \vec{H}_m \quad (1)$$

자성체가 있는 경우의 자속밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

여기서  $\vec{M}$ 은 자화량,  $\mu_0$ 는 공기중의 투자율이며 자화량은 자화율과  $\vec{H}$ 의 곱으로 나타난다.

Maxwell 방정식을 이용하여 정리하면 아래와 같은 식이 구해진다.

$$\nabla \cdot \vec{B} = \mu_0 \nabla \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = 0 \quad (3)$$

$\vec{H}_c$ 는 코일에 의해서 발생한 자계이고,  $\vec{H}_m$ 은  $\vec{H}_c$ 에 의하여 자성체에 유기된 자계이므로 다음의 수식이 유도된다.

$$\nabla \cdot \vec{H}_c = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H}_c = \mu_0 \vec{J} \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{H}_m = 0 \quad (6)$$

따라서 아래의 관계식을 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{H}_m = -\nabla \cdot \vec{M} \quad (7)$$

위의 식에 자기 스칼라 포텐셜의 개념을 도입하여 그 해를 구하면 다음과 같다.

$$\vec{H}_m = -\frac{1}{4\pi} \left[ \nabla \oint_S \frac{\sigma(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dS + \nabla \int_V \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV \right] \quad (8)$$

$$\vec{H}_c = \frac{1}{\chi} \vec{M} - \frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\vec{M} \cdot \hat{n}(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS \quad (9)$$

식 (9)에도  $\rho(\vec{r})$ 항이 포함되어야 하지만 요소별 수치적분에서 한 요소 내에서는 자화량이  $\vec{M}$ 일정하다고 가정하면  $\rho(\vec{r})=0$ 이 되어 위와 같은 간단한 형태로 정리된다.

임의의 한 점에서의 자계를 계산하기 위해서는 위의 결과식을 이용하여 각 요소별 자화값을 구하고 식 (1)

1. 서 론

최근에 회전형 소형 전기기기 등의 분야에서 기기의 구동상태를 외부에 나타내기 위한 방법으로 디스크형 발전기를 채용하는 경우가 많아지고 있다. 이러한 디스크형 발전기 중에서 회전축을 중심으로 동심원 형태로 원주 방향을 따라 코일을 결선하고 일체형 슬롯구조를 이용하여 코일 사용을 최대화하는 형태가 기존 모델로써 사용되어지고 있다.

그러나 이러한 디스크형 발전기는 슬롯구조의 일체성과 조밀성 등으로 인하여 코일은 손실없이 전부 이용할 수 있는 반면에 자석에서 발생하는 자속의 상당량이 손실되는 결점이 발생한다. 따라서 유사한 설계 제한사항(부피, 무게, 코일 및 코어)을 지니면서도 더욱 향상된 특성을 나타내는 새로운 디스크형 발전기가 제안될 수 있다.

본 논문에서는 기존의 일체형 슬롯구조와 원주방향을 따라 동심원 형태로 감겨져 있는 코일대신에 분리형 슬롯구조와 극간 직렬 연결된 코일을 채용한 새로운 디스크형 발전기를 제안하여 특성 해석을 수행하고 기존 모델과의 결과 비교를 통하여 제안된 형태의 디스크형 발전기가 우수함을 입증하였다.

기존 모델과 제안된 모델의 특성해석을 위해서는 체적적분방정식법(VIEM)을 이용하였고 발전기의 가장 중요한 특성인 역기전력 파형의 비교를 통한 성능 평가를 행하였다.

2. 본 론

2.1 해석 방법

본 논문에서는 디스크형 발전기의 특성 해석을 위해서 체적적분방정식법을 이용했는데 전체 자계는 다음과 같

에 의하여 코일에 의해 유기된 자계값과 자성체 자화에 의해 유기된 자계값의 합으로 구한다. 임의의 점에서의 자계값은 아래의 식에서 구해진다.

$$\vec{H}_x = \vec{H}_{cx} + \frac{1}{4\pi} \text{sig} \sum_{j=0}^N (Q_{jx}M_{jx} + Q_{jy}M_{jy} + Q_{jz}M_{jz}) \quad (10)$$

$$\vec{H}_y = \vec{H}_{cy} + \frac{1}{4\pi} \text{sig} \sum_{j=0}^N (P_{jx}M_{jx} + P_{jy}M_{jy} + P_{jz}M_{jz}) \quad (11)$$

$$\vec{H}_z = \vec{H}_{cz} + \frac{1}{4\pi} \text{sig} \sum_{j=0}^N (R_{jx}M_{jx} + R_{jy}M_{jy} + R_{jz}M_{jz}) \quad (12)$$

여기서  $P, Q, R$ 은 요소별 자화값을 구할 때 나타나는 일정 방향 성분계수들이다.

이 식들을 이용하여 자계를 계산할 경우 발생하는 문제는 전류의 값이 변할 경우 자화 값과 코일에 의한 자계값을 다시 계산하여야 하는가 하는 문제이다. 이러한 난해성 때문에 시스템의 선형성을 가정하여 문제를 간략화 했다.

본 논문의 모델처럼 영구자석이 해석 영역 내에 포함된 경우에 체적적분방정식법을 이용하여 풀이하는 방법은 다음의 두가지 경우로 나누어서 생각할 수 있다.

첫 번째 방법은 다음과 같다. 영구자석은 외부 자계에 영향을 받지 않는다고 볼 수 있으므로 코일에서 유기된 자계를 계산하는 방법과 동일하게 자석에 일정한 자화량을 부여하고 그로부터 유기된 자계를 코일에 의해 유기된 자계값과 더하여 행렬식의 구동항에 추가하는 방법이다.

두 번째 방법은 첫 번째 방법과 동일한 결과를 얻을 수 있으나 프로그램은 더 간단해 지는 장점을 가지고 있다. 영구자석도 코어의 데이터와 함께 데이터에 포함시킨 뒤 유한요소 해석에서 특정 점에 Dirichlet 경계조건을 부여하는 것과 마찬가지로 영구자석에 해당하는 요소에 강제적으로 일정한 양의 자화량을 부여하여 경계조건 처리를 하는 방법이다.

## 2.2 해석 모델의 구조 및 변형

아래 그림 1에 실제의 디스크형 발전기가 나타나 있고 그림 2에는 요소 분할된 형태가 주어져 있다.

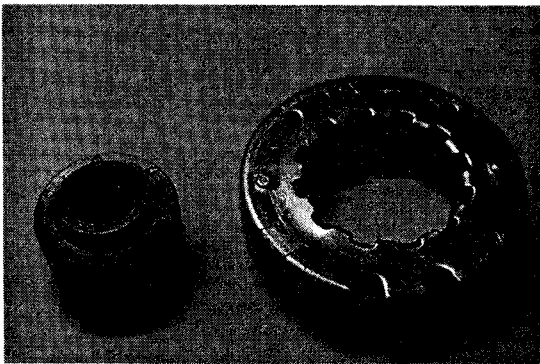


그림 1 해석 모델 (디스크형 발전기)  
Fig. 1 Analysis model (Disk type generator)

왼쪽편의 작은 부분이 회전축을 지지하는 보빈과 결합되어 있는 계자자석이고 오른쪽의 큰 부분이 코어내부에 코일을 지니고 있는 회전자 부분이다. 자석은 반경방향으로 착자되어 있고 코일은 회전축을 중심으로 동심원을

이루며 감겨져 있다. 자석내부에 백아이언(back-iron)이 없는 형태이기 때문에 먼저 백아이언(back-iron)이 있는 경우와 없는 경우의 결과를 비교하였다.

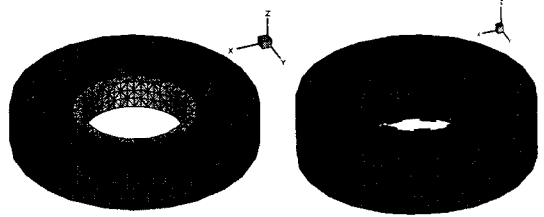


그림 2 체적적분방정식을 적용하기 위한 해석 모델  
Fig. 2 Analysis model for VIEM

왼쪽의 모델은 회전자와 함께 계자자석을 나타낸 형태이고 오른쪽은 계자자석을 생략하고 회전자의 치구조를 보이도록 나타낸 모델이다. 다음 표1에서는 해석 모델의 사양을 보여주고 있다.

표 1 기존 모델의 사양  
Table 1 Spec. of conventional model

극수	24	회전자 외경	36[mm]
코일 턴수	800	회전자 두께	7.5[mm]
회전자 내경	18.6[mm]	자석 두께	1.2[mm]

전술한 바와 같이 표 1에서 회전자 외경, 회전자 두께 및 잔류자속밀도는 제안된 모델에서도 같은 값을 가지게 된다. 동일한 전기, 기계적 제한 조건에서 비교해야 하기 때문이다.

다음의 그림 3과 표 2는 각각 분리형 슬롯구조를 지니는 모델의 구조 및 사양을 나타내고 있다.

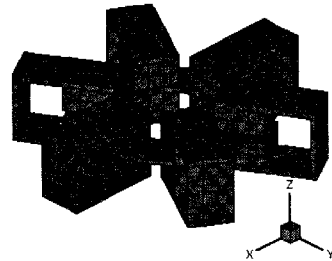


그림 3 분리형 슬롯구조를 지니는 디스크형 발전기  
Fig. 3 Disk type generator with separated slots

위 그림에서처럼 각각의 슬롯이 분리되어 있고 각 슬롯에 독립적으로 감겨져 있는 코일을 직렬로 연결하여 역기전력 파형을 구한다. 기존모델의 반경방향 착자와는 다르게 상하방향 자속분포를 나타내는 자석을 사용하여 구조상 백아이언(back-iron)은 불필요하다.

표 2 제안된 모델의 사양  
Table 2 Spec. of suggested model

극수	6	회전자 외경	36[mm]
코일 턴수	280	회전자 두께	7.5[mm]
회전자 내경	14.8[mm]	잔류자속밀도	3[mm]

### 2.3 해석 결과 및 비교

두가지 모델의 특성 비교를 위하여 초당 회전수를 10 회로 동일하게 설정하여 실험을 수행하였다. 백아이언(back-iron)이 없는 경우의 일체형 모델의 자속 분포의 변화가 그림 4에 나타나 있다.

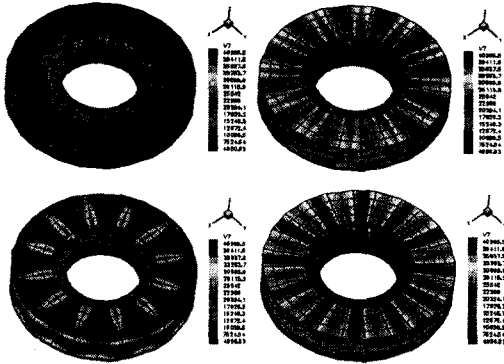


그림 4 자속 분포의 변화 1(0°, 3.5°, 7.5°, 12°)  
Fig. 4 Variation of flux distribution 1

그림 5에서는 백아이언(back-iron)이 있는 경우와 없는 경우의 역기전력 파형을 비교하고 있다.

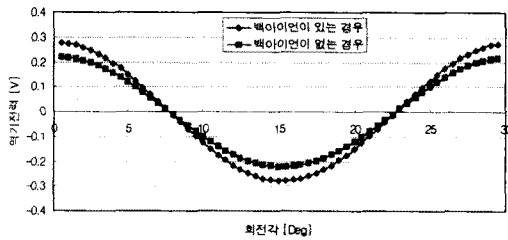


그림 5 역기전력 파형 1  
Fig. 5 Back-emf waveform 1

최대값을 비교해 볼 때 백아이언(back-iron)이 있으면 없는 경우보다 역기전력이 약 27%정도가 증가한다. 다음 그림 6에서는 분리형 슬롯구조를 지나는 경우의 자속 분포의 변화를 보여준다.

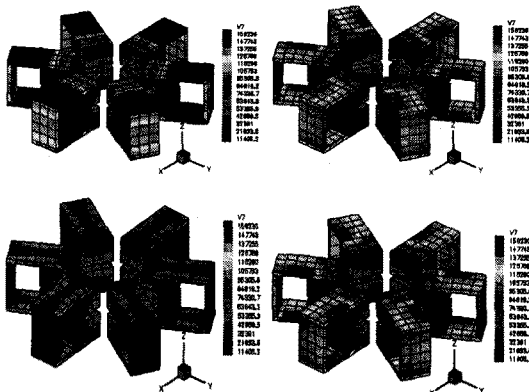


그림 6 자속 분포의 변화 2(0°, 7.5°, 15°, 22.5°)  
Fig. 6 Variation of flux distribution 2

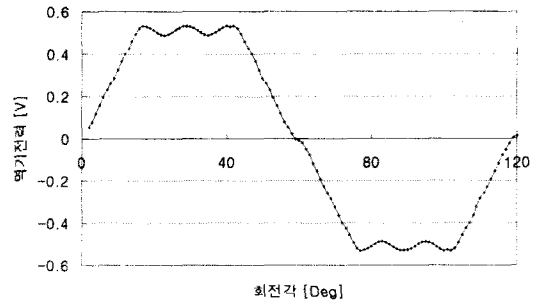


그림 7 역기전력 파형 2  
Fig. 7 Back-emf waveform 2

그림 7은 분리형 슬롯구조를 지나는 경우의 회전각에 따른 역기전력 파형을 보여주고 있다. 6극이기 때문에 한 주기를 나타내기 위해 120° 회전할 동안의 역기전력을 나타내었다. 기존의 일체형 모델보다 극수가 감소했기 때문에 발생하는 역기전력의 맥동 성분을 무시하고 최대값만을 비교했을 때 기존 모델보다 역기전력이 137%만큼 증가하였고 백아이언(back-iron)이 있는 경우와 비교하여도 83% 증가하였다. 위의 결과로부터 제안된 형태의 슬롯구조를 이용함으로써 향상된 특성의 디스크형 발전기의 제작이 가능하다는 것을 알 수 있다. 실제 설계에의 응용을 위해서는 극수의 증가나 코어의 형태 최적화, 다른 형태의 자석 자화 등을 이용하여 좀 더 매끄러운 파형을 얻을 수 있도록 하고 논문에서 제시된 제한 사항과 함께 제작의 간편성 등을 쉽게 고려할 수 있는 기법의 도입이 필요할 것이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 소형의 회전기기 등에서 구동상태를 표시해 주는 디스크형 발전기의 몇가지 형태를 살펴보았다. 기존의 일체형 슬롯 구조 대신 분리형 슬롯 구조를 지나는 모델을 제안하여 특성을 해석하고 결과를 비교하였다. 동일한 제한 사항과 함께 체적분방정식법을 두 모델에 함께 적용하여 자속 분포와 역기전력 등 주요 특성을 해석하여 그 결과를 함께 비교함으로써 제안된 모델의 우수성을 입증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Makoto Koizumi, "A New Vector Element in the Volume Integral Equation Method for Nonlinear Magnetostatics," IEEE Trans. Magnetics, Vol.31, No.3, pp. 1516-1519, May, 1995.
- [2] Lauri Kettunen and Larry R. Turner, "A Volume Integral Formulation for Nonlinear Magnetostatics and Eddy Currents Using Edge Elements," IEEE Trans. Magnetics, Vol.28, No.2, pp. 1639-1642, March, 1992.
- [3] O.A. Mohammed, Magnetic Vector Potential Based Formulation and Computation of Nonlinear Three Dimensional Magnetostatic Fields and Forces in Electrical Devices by Finite Elements, Ph. D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1983.