

## Axi-periodic Analysis을 이용한 대형 터보 발전기 단부 Flux Shield의 Eddy Current Loss 산정

권순오, 이정종, 홍정표, 남혁\*  
창원대학교 전기공학과, LG전자\*

### Eddy current loss calculation of flux shield in the large turbo generator using axi-periodic analysis

Soon O Kwon, Jung Jong Lee, Jung Pyo Hong, Hyuk Nam\*  
Dept. of Electrical Engineering Changwon National University, LG Electronics\*

**Abstract** – Axi-periodic analysis using magnetic vector potential is formulated in time harmonic field and applied to the field analysis for the end region of large turbo generator in this paper. By using axi-periodic analysis, the effect of flux shield, one of the structure placed in the end region of large turbo generator to prevent stator end from thermal damage, is studied, and eddy current loss in the flux shield is estimated for operation conditions. 3D FEA is used for the verification of presented analysis method. Because 3D flux distribution can be calculated with 2D modeling, magnetic field showing 3D distribution can be effectively calculated by axi-periodic analysis comparing with 3D FEA.

## 1. 서 론

현대 산업의 발전과 생활수준의 향상으로 인해 전력의 수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 전력수요의 증가를 감당하기 위한 방안으로 발전기의 대용량화를 들 수 있다. 발전기가 대용량화됨에 따라 단부 권선이 받는 전자기력, 고정자 단부의 eddy current에 의한 발열 등이 중요한 설계 변수로 작용하여, 권선의 지지물 설계, eddy current에 의한 전기자의 열화를 방지하는 flux shield의 설계를 위한 전자계 해석이 필수적이다.

대형 터빈 발전기의 고정자 단부에서는 단부권선에 의해 발생한 자속 중 고정자 단부의 표면과 수직한 자속성 분이 시간에 따라 변화함으로써 고정자 단부에 eddy current가 발생하게 되며, eddy current는 고정자 단부의 온도를 상승시켜 단부의 변형 및 손상을 일으킨다. 이러한 열적 손상을 방지하기 위하여 고정자 단부에 전기 전도율이 높은 flux shield를 설치하여 고정자 단부로 유입되는 자속을 차단하게 된다. 이때, flux shield에 상당한 eddy current가 흐르고 이로 인해 flux shield의 온도가 상승하게 되지만, flux shield는 고정자에 비해 냉각이 용이하여 flux shield의 eddy current에 의한 발열은 크게 문제 되지 않는다. Flux shield에는 eddy current loss가 발생하게 되며 이는 발전기의 용량에 따라 증가하게 된다. eddy current loss는 또한 발전기의 운전 상태에 따라 변화하고 이러한 손실의 변화는 운전 조건에 따른 발전기의 상태 예측 및 발전기의 효율 산정에 필수적이므로 초기 설계 시 반드시 고려되어야 한다.

발전기 단부 영역은 3차원적인 전기자 권선의 분포로 인해 3차원적인 자속 분포를 나타낸다. 따라서 3차원 유한요소 해석법이 적절적으로 전자계 해석에 적용될 수 있다. 그러나 전기자 권선 모델링의 어려움과 많은 요소 수로 인해 3차원 유한요소 해석에는 많은 시간과 노력이 필요하여 대형 발전기의 초기 설계에 3차원 유한요소 해석을 적용하기엔 현실적인 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 axi-periodic analysis를 발전기 단부 전자계 해

석에 적용하여 전자계 해석을 효율적으로 수행하였으며 그 결과 flux shield의 eddy current loss를 산정하였다.

해석 결과의 신뢰성 검증을 위하여 정자계에서 axi-periodic analysis와 3차원 유한요소해석을 수행하여 단부 영역의 자속 밀도를 비교하였다. 3차원 유한요소 해석은 1-step당 약 2시간의 해석시간을 필요로 한 반면, axi-periodic analysis는 1 step당 1분 이내의 해석 시간을 필요로 하여 자체 해석의 효율성을 크게 증가 시켰다.

## 2. Axi-periodic analysis

### 2.1 가정

Axi-periodic analysis는 준 3차원 해석 기법으로 2차원 모델링으로부터 3차원적인 자속 분포를 얻을 수 있다. Axi-periodic analysis를 발전기 단부의 전자계 해석에 적용하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다. [1]-[3]

가) 슬롯에 의한 영향은 고려하지 않는다.

나) 변위전류는 고려하지 않는다.

다) 차상재료는 등방성이며 무한한 투자율을 갖는다.

라) 해석 모델은 축을 중심으로 회전방향으로 대칭적인 형상을 가진다.

마) 전기자와 계자 권선전류는 회전방향과 축 방향에 대해 정현적으로 분포한다.

### 2.2 Axi-periodic formulation

시변자계의 맥스웰 방정식은 (1), (2)와 같으며 Galerkin법으로 정식화 하기 위한 가중함수( $W_i$ )와 형상함수( $N_i$ )는 각각 (3), (4)와 같다. Axi-periodic 문제에서 모델링은 원통 좌표계의 r-z 평면에서 이루어지므로 형상함수는 (3), (4)와 같이 r-z 평면에서 정의 된다.

$$\nabla \times (\mu \nabla \times \vec{A}) = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) + \vec{J}_e \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \phi) = 0 \quad (2)$$

$$W_i = N_i(r, z)e^{j\nu o} \quad (3)$$

$$N_i(r, \theta, z) = N_i(r, z)e^{-j\nu o} \quad (4)$$

여기서,  $\nu$ ,  $\vec{A}$ ,  $\sigma$ ,  $\phi$ ,  $\vec{J}_e$ 는 각각 자기 저항률, 자기 백터 포텐셜, 도전율, 전기 스칼라 포텐셜, 전류 밀도를 나타낸다.

해석 모델의 전류 source는 발전기 단부 권선 영역의 전류 분포가 축 방향과 회전 방향에 대해 각각 정현적인 분포로 근사화가 가능하며 기본파만을 고려한 전류 sour

ce를 적용하였다[1]-[3].

#### 2.4 Eddy current loss in flux shield

Flux shield의 eddy current loss는 (5)을 이용하여 산정하였다. 여기서,  $P_e$ ,  $p_e^k$ ,  $k$ ,  $J_e^k$ ,  $\sigma^k$ 는 각각 총 eddy current loss, 고조파 차수에 따른 eddy current loss, 고조파차수, eddy current density, flux shield의 도전율을 각각 나타낸다. 본 논문에서는 flux shield의 eddy current loss 산정 시 기본파 성분만을 고려하였다.

$$P_e = \sum_k p_e^k \quad 5)$$

$$p_e^k = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \int_v \frac{J_e^k \cdot J_e^{k*}}{\sigma^k} \right]$$

$$J_e^k = -j\omega\sigma^k A^k$$

### 3. 해석 결과 및 검증

#### 3.1 해석 모델

Axi-periodic analysis의 신뢰성 검증을 위하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 그림 1에 해석 모델을 나타내었고, 그림 2에 전기자와 계자 권선의 형상을 나타내었다.

3차원 유한요소해석은 정자계에서 수행 되었으며 전기자 권선의 모델링은 실제 발전기 단부 권선 좌표로부터 근사화 하였다.

Axi-periodic analysis model은 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 점 P는 자속 밀도 산정 위치이고 전기자 권선(top coil과 bottom coil)에 축 방향과 회전 방향으로 정현적인 전류 source를 인가한다.

#### 3.2 Static field analysis

그림 3의 점 P와 3차원 해석 모델에서의 동일한 위치에서, 회전 방향에 대한 반경방향자속 밀도와 축방향 자속 밀도를 그림 4와 5에서 비교하였다. 그림 5는 축방향 자속 산정 라인(L)을 따라 자속 밀도를 비교한 결과이다.

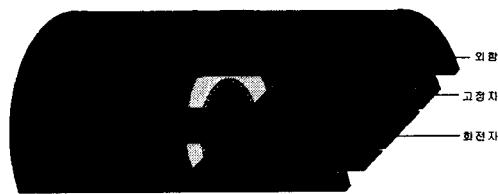


그림 1. 해석 대상 발전기의 1/4 모델

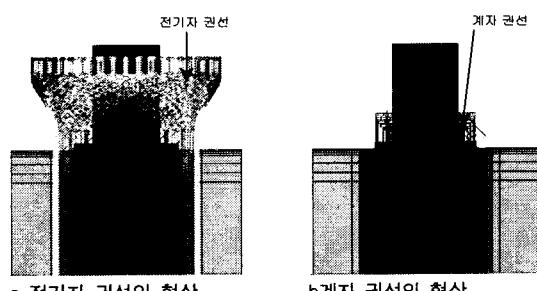


그림 2. 전기자 권선과 계자 권선의 형상

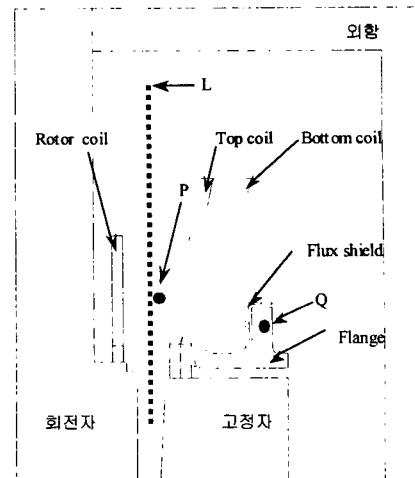


그림 3. Axi-periodic analysis model

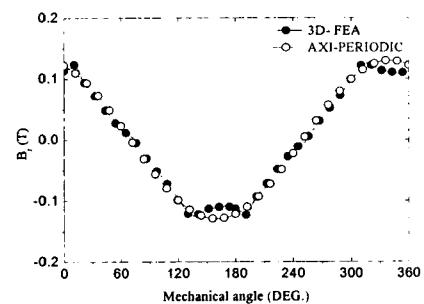


그림 4.  $B_r$  at P

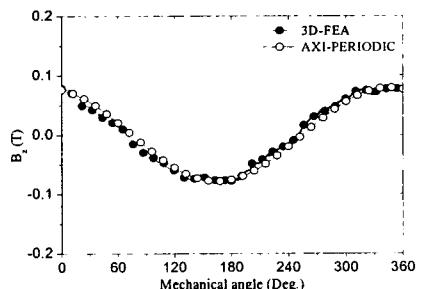


그림 5.  $B_z$  at P

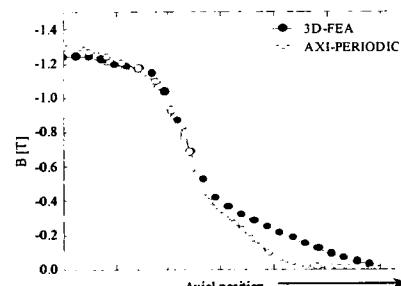


그림 6. 3차원 유한요소 해석과 axi-periodic analysis의 자속밀도 비교( along line L )

### 3.4 Time harmonic field analysis

그림 7에 flux shield의 영향을 살펴 보기 위한 time harmonic 해석 결과를 나타내었다. 그림 7 a는 flux shield가 존재하지 않은 경우이고, b는 flux shield가 존재하는 경우이다. 그림의 등포텐셜 분포로부터 flux shield가 존재하는 경우 자속은 flux shield를 통과 하지 못하고 자로가 flux shield를 우회하여 형성된 반면 flux shield가 존재하지 않는 경우에는 바로 flange를 통과하여 고정자 단부로 유입됨을 알 수 있다. 단부 권선에 의해 발생한 자속이 등포텐셜 라인으로는 고정자 단부의 자속 밀도가 명확히 확인 되지 않으므로 그림 8과 9에 점 Q에서의 자속 밀도를 비교하였다. 비교 결과 flux shield를 설치 한 경우 고정자 단부로 유입되는 자속이 flux shield의 eddy current에 의해 현저히 감소함을 알 수 있다. 따라서 고정자 단부의 eddy current loss는 감소하여 eddy current에 의한 고정자 단부의 열적 손상을 줄일 수 있을 것을 예상 할 수 있다.

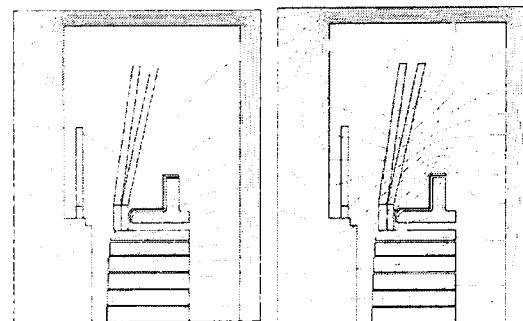
그림 10에 운전 조건에 따른 flux shield의 eddy current loss를 나타내었다. 그림 10에서 eddy current loss는 90° 진상에 대한 eddy current loss의 기준으로 부하각 변동에 따른 순실 비를 나타내었다. 발전기는 평상시 지상 역율로 운전 되며 계통 부하에 따라 진상 역율로 운전되기도 하며 이때에는 전기자 권선 전류에 의한 자계와 계자 자계가 서로 합성하여 전체 자속량은 증가하여 flux shield의 eddy current loss는 증가하게 되며 지상인 경우 그 반대이다[4].

## 4. 결 론

본 논문에서는 자기 벡터 포텐셜을 이용한 axi-periodic analysis를 정식화하여 대형 터보 발전기의 단부 전자계해석에 적용하였다. Axi-periodic analysis의 적용을 통해 대형 발전기 단부의 구조물 중 하나인 flux shield의 기능을 확인하였으며 flux shield에서 발생하는 eddy current loss를 산정 하였다. 해석 신뢰성의 검증을 위해 3차원 유한요소 해석이 수행 되어 단부 권선 영역의 자속 밀도가 비교되었다. Axi-periodic analysis는 정식화에 필요한 가정으로 인해 해석의 정밀도는 다소 떨어지지만, 3차원 유한요소 해석에 비해 훨씬 적은 노력과 시간으로 해석 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서 제시된 flux shield의 eddy current loss의 산정 이외에, flux shield의 형상 설계, 고정자 단부의 end step 설계, 권선영역의 힘 분포 산정 등 발전기 단부 구조물의 설계 전반에 효율적으로 적용이 가능하여 대형 발전기의 초기 설계에 아주 효과적으로 적용이 가능하다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Sheppard J. Salom, "Finite element analysis of electrical machines", Kluwer academic publishers, pp. 211-220, 1995.
- [2] G.K.M Khan, G. W. Buckley, N. Brooks, "Calculation of forces and stresses on generator endwindings - part I: Forces, "IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 4, No. 4, December 1989.
- [3] V. Varbero, G. Dal Mut, G. Grigoli, M. Santamaria, "Axisymmetric analysis and experimental measurements of magnetic field in the end region of a turbine generator", IEEE Trans. Magn., vol. M AG-19, no. 6, November, 1983.
- [4] G.M.K Khan, G.W. Buckley, N. Brooks, "An Integrated Approach for the Calculation of Losses and Temperatures in the End-region of large Turbine Generators", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 5, No. 1, March 1990.



a. Flux shield가 존재하지 않음 b. Flux shield가 존재

그림 7. flux shield의 유무에 따른 자속 분포

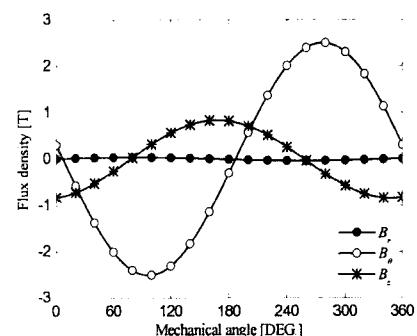


그림 8. Flux shield를 적용하지 않은 경우 자속 밀도(at Q)

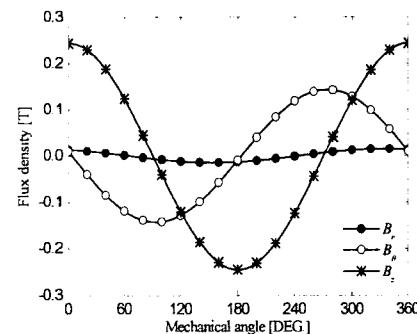


그림 9. Flux shield를 적용한 경우 자속 밀도 (at Q)

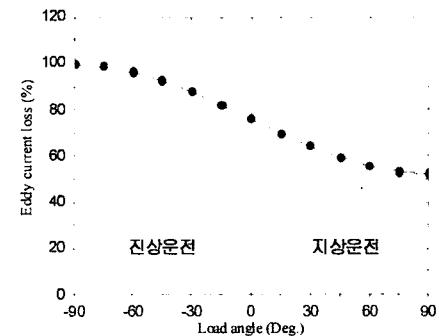


그림 10. 운전 방식에 따른 flux shield의 eddy current loss