

## 회전자 이동을 고려한 발전기 공극자속 및 유기전압의 고조파 해석

\*김 창업<sup>a,b</sup> 정 용배<sup>a</sup> 윤 승진<sup>a</sup> 박 병섭<sup>a</sup> 하 현성<sup>a</sup> 노 철웅<sup>a</sup> 김 송옹<sup>a</sup> 김 중한<sup>a</sup> 임 달호<sup>b</sup> 고 요<sup>c</sup>  
효성중공업(주)<sup>a</sup> 한양대학교 전기공학과<sup>b</sup> 에너지자원 기술개발 지원센터<sup>c</sup>

### Harmonics Analysis of Air Gap Flux and Output Voltage in Generator Taking Account of the Rotor Movement

C. E. Kim<sup>a,b</sup>, Y. B. Jung<sup>a</sup>, S. J. Yoon<sup>a</sup>, B. S. Park<sup>a</sup>, H. S. Ha<sup>a</sup>, C. W. Noh<sup>a</sup>, S. W. Kim<sup>a</sup>, J. H. Kim<sup>a</sup>, D. H. Im<sup>b</sup> and Y. Ko<sup>c</sup>  
Hyosung Industries Co., Ltd.<sup>a</sup>, Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University<sup>b</sup>, R.A.C.E.R<sup>c</sup>

**Abstract** - This paper presents an analyzing method of the distortion factor of the output voltage in generator on the basis of the stator coil flux linkage calculation. In the simulation, 2 dimensional finite element method is used considering the rotor movement. As an application of the proposed method, we calculated the harmonics of air gap flux and the output voltage in the 150KW class synchronous generator.

#### I. 서 론

발전기, 전동기등과 같은 전기기기에서의 에너지 변환 동작은 공극의 자속을 매개로 이루어진다. 그러나, 공극 자속 중에는 에너지 변환에는 도움이 되지 않는 고조파 성분이 포함되어 소음, 진동, 국부 과열등의 원인이 되어 기기에 나쁜 영향을 미친다. 따라서 전기기기 설계에서는 무부하 정격전압에서의 과형 유통을 기준치 이하로 억제하도록 규정되어 있다<sup>[1]</sup>. 고조파는 주로 슬롯에 의한 퍼미언스 리플, 기자력 고조파, 철심의 포화 등에 의해 일어난다. 그러나, 퍼미언스법에 의한 일반적인 설계 방법으로는 고차 고조파를 정량적으로 구하기가 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 최근에는 유한요소법과 같은 수치 해석적 방법으로 고조파를 분석하는 연구가 진행되고 있다<sup>[2][3]</sup>. 본 논문에서는 당시에서 설계 및 제작하고 있는 발전기의 공극자속 및 유기전압 과형 유행율을 전선쇄교자속 계산에 기초하여 분석한 결과를 보고하고자 한다. 해석 방법은 회전자의 이동을 고려한 이차원 유한요소법을 적용하여<sup>[4][5]</sup> 무부하 정격전압에서 발전기 각 위치마다 공극자속 및 1차권선 쇄교자속을 구하여 이것을 DFT (Discrete Fourier Transform)로 처리하여<sup>[6]</sup> 유기전압 고조파 및 과형 유행율을 계산하였다.

#### II. 해석 방법

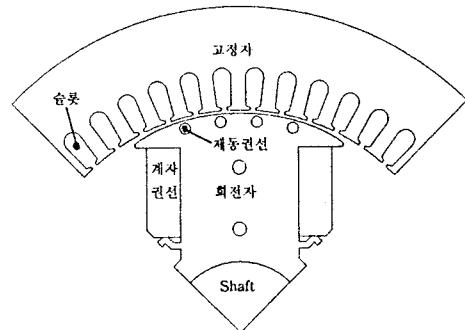
##### 1. 해석 모델

본 논문에서 해석 대상으로 한 기기는 3상 AC 380V 4극 둘극형 동기발전기로써 발전기 사양은 표 1과 같다. 여자전류는 회전자와 같은 축에 연결된 Exitor로부터 유기되는 교류전류를 3상간좌표형으로 정류하여 계자에 공급된다.

표 1. 발전기 사양

고정자	회전자 (계자)
최소 공극 [mm]	2.5
주파수 [Hz]	60
극 수	4
상 수	3
Slot 수	48
내경 / 외경 [mm]	341 / 500      110 / 336
재질	S-18 (고정자, 계자) S-45C (Shaft)

그림 1은 발전기의 1극분을 나타낸 것이다. 무부하 정상상태에서는 4극이 모두 같은 상황이며 주기조건이 성립하므로 1극분만을 해석모델로 하였다.



##### 2. 유한요소 해석

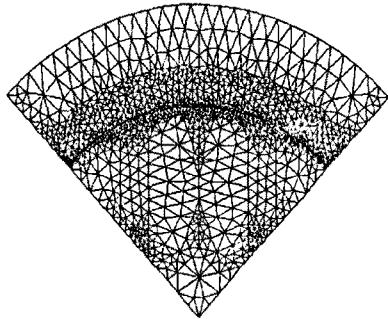
해석 대상 영역을 2차원 유한요소 해석을 하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 계자전류는 축방향으로만 흐른다.
- 2) 고정자 및 회전자에 흐르는 전류는 무시한다.
- 3) 무부하 정상상태만 고려하므로 제동권선에서의 전류는 무시한다.

이때의 저배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 자기벡터 포텐셜,  $\mu$ 는 자기투자율,  $J$ 는 계자권선에 흐르는 전류밀도이다. 그림 2는 해석 영역의 요소분할도 및 공극부분의 요소를 확대한 것이다. 공극부분의 요소는 3중으로 구성되어 있으며 가운데 축에서는 고정자 1 Slot Pitch당 약 8개의 요소로 나누어져 있다. 무부하 정상상태에서는 자속의 분포가 고정자의 1 Slot Pitch만큼 이동할 때마다 동일하게 반복되므로 회전자가 1 Slot Pitch 이동하는 동안만 해석하여도 1주기동안의 자속분포를 해석할 수 있다. 본 해석에서는 고정자의 1 Slot Pitch 가 기계각으로 7.5°이며, 회전자는 고정자의 1 Slot Pitch의 1/10만큼의 거리씩 이동할 때마다 자속분포를 해석하였다. 또한, 고정자의 1 Slot Pitch 만큼 회전자를 이동시키기 위해 공극의 중간층에 Moving Band를 설정하여 주었다<sup>[4][5]</sup>. 발전기 Core에 사용된 철심은 S-18, Shaft용 재료는 S-45C로 비선형 특성을 고려하여 해석하였다.



(a) 요소분할도

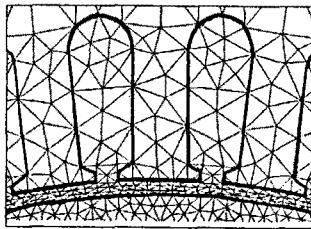


그림 2. 요소분할도 및 공극부분의 요소분할 확대도  
(요소수 : 2873, 절점수 : 1486)

하나의 코일에 쇄교하는 자속량은 자기백터포텐셜 A를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = (A_1 - A_2) l \quad (2)$$

따라서 발전기에 유기되는 상전압은 1상 코일에 쇄교하는 총 자속량  $\phi_p$  를 사용하여 다음과으로 나타낼 수 있다.

$$V_p = -\frac{d\phi_p}{dt} \quad (3)$$

1극당 고정자 slot수가 12개, 1 Slot Pitch당 회전자의 이동횟수가 10일경우 1주기당 총 240개의 이산화된 유기전압값을 얻을수 있다. 이 240개의 이산화된 유기전압값은 고조파를 포함하고 있기 때문에 다음과 같은 DFT(Discrete Fourier Transform)을 사용하여<sup>[6]</sup> 고조파를 분석하였다.

$$V_k = \sum_{n=0}^{N-1} V_p(n) e^{-j2\pi nk/N}, \quad (k=0,1,2, \dots, N-1) \quad (4)$$

단, N : 한 주기당 이산화된 유기전압 Data 수

k : 고조파 차수

$$j = \sqrt{-1}$$

또한 선간전압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_1 = V_p(\omega t) - V_p(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (5)$$

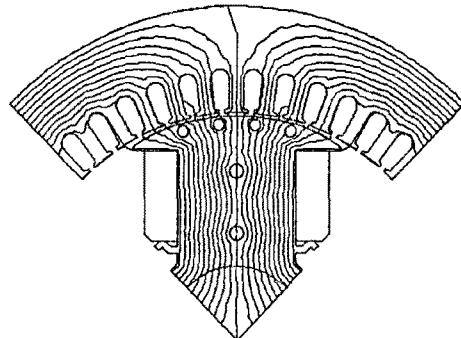
위와 같이 각 고조파를 분석한후 유기전압의 파형 웨이율은 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>[6]</sup>

$$\text{웨이율} = \frac{|V_k|}{V_1} \times 100 (\%) \quad (6)$$

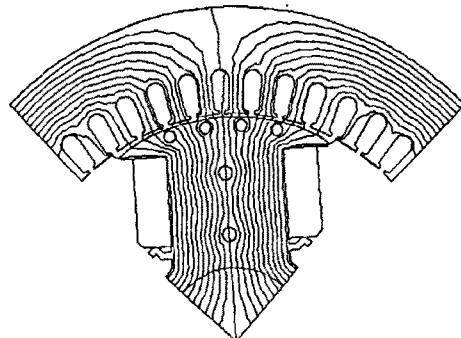
단,  $V_1$  은 기본파 크기

$$V_k^* \text{는 고조파 성분으로 } V_k^* = \sqrt{\sum_{k=2}^n |V_k|^2} \text{ 이다.}$$

그림 3은 회전자의 초기위치 및 1/2 Slot Pitch 만큼 반시계방향으로 이동했을 때의 자속 분포를 나타낸 것이다.



(a) 회전자 초기 위치



(b) 회전자 3.75° 이동

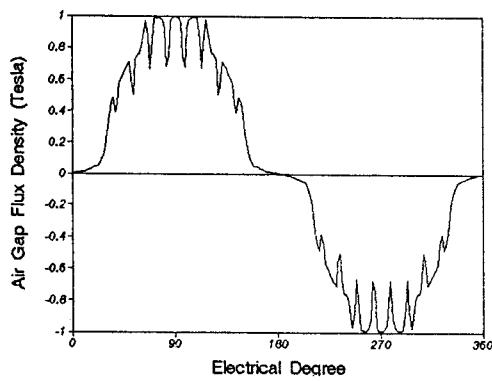
그림 3. 회전자 이동에 따른 자속분포

### III. 해석결과 및 검토

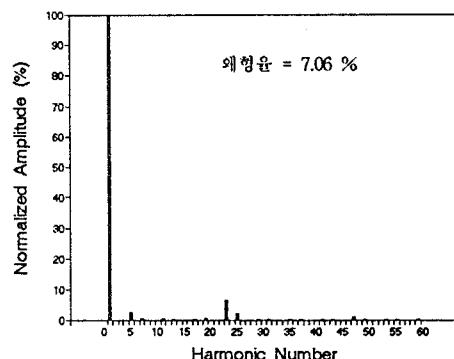
그림 4, 그림 5는 각각 공극자속 및 선간전압파형과 DFT로 분석한 고조파 내용이고, 그림 6은 선간전압 측정파형이다. Simulation 결과 선간전압의 고조파는 Y 절선이므로 제3고조파가 거의 나타나지 않고 5 고조파 및 slot 고조파인 23, 25 고조파가 대부분이었다. 실험치와 비교한 결과 파형 및 웨이율이 근사함을 확인할 수 있었다.

### IV. 결 론

본 논문에서는 무부하 정격전압에서 발전기 공극자속 및 유기전압 파형을 유한요소법에 의하여 구하는 방법을 제시하였다. 해석방법으로는 공극에서 moving band 를 적용하여 이동시마다 공극부분만을 재분할하여 계산시간을 단축할수 있었다. 해석결과를 150 KW급 발전기 유기전압 실험치와 비교하여 타당성을 입증하였다. 향후 발전기 과도상태 및 부하시 특성에 대한 연구와 유기전압 파형율의 저감에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

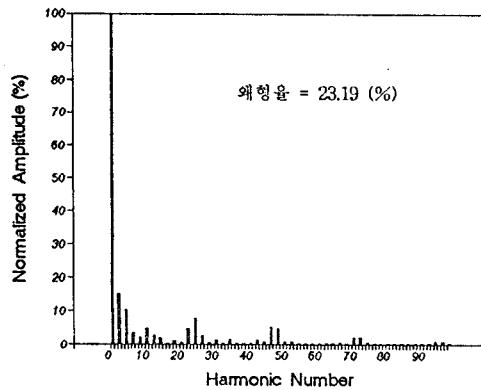


(a) 공극자속밀도 분포



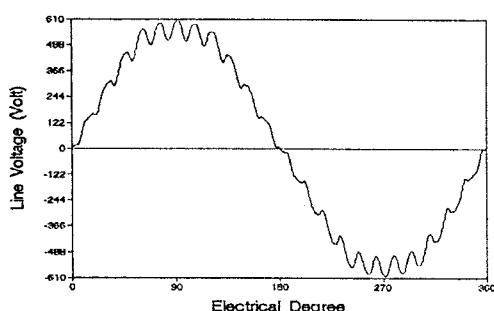
(b) 고조파 성분

그림 5. 선간전압 파형 및 고조파 성분



(b) 고조파 성분

그림 4. 공극자속밀도 분포 및 고조파 성분



(a) 선간전압 파형

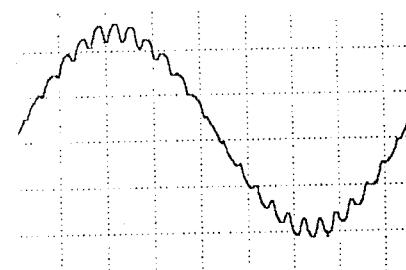


그림 6. 선간전압 측정 과정

#### 참 고 문 헌

- [1] 電氣學會 電氣規格調查會標準規格 JEC-114 同期機, 1964
- [2] K. Ide, et al., "Higher harmonics calculation of synchronous generators on the basis of magnetic field analysis considering rotor movement," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, pp.1359-1362, 1992.
- [3] 三上浩幸 外 4人, "三相誘導機の機内高調波磁場解析," 電學回轉機研資, RM-93-91, 1993.
- [4] B. Davat, Z. Ren and M. Rajoi-Mazenc, "The movement in field modeling," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 21, pp.2296-2298, Nov. 1985.
- [5] Dal-Ho Im, Chang-Eob Kim, " Finite element force calculation of a linear induction motor taking account of the movement", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, Sep. 1994 (to be published)
- [6] R. C. Dorf, Electrical Engineering HandBook, CRC Press, 1993