

# 회전자 이동을 고려한 발전기 유기전압의 고조파 해석

임달호 · 김창업

한양대학교 전기공학과

서울특별시 성동구 행당동 17번지, 133-791

정용배

효성중공업 기술연구소

서울특별시 영등포구 당산동 5가 4번지, 150-045

(1995년 2월 20일 받음, 1995년 4월 15일 최종수정본 받음)

본 논문에서는 돌극형 발전기의 유기전압 고조파 해석 방법을 제안하였다. 해석방법은 회전자 이동을 고려한 2차원 유한요소법을 사용하여 고정자 코일에 쇄교하는 자속을 구하고 이를 DFT로 분석하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 150 KW 동기발전기의 유기전압 고조파를 구하고 이를 실험치와 비교하였다.

## I. 서 론

발전기, 전동기등과 같은 전기기기에서의 에너지 변환 동작은 공극의 자속을 매개로 이루어진다. 그러나 공극 자속중에는 에너지 변환에는 도움이 되지 않는 고조파 성분도 포함되어 소음, 진동, 국부 과열 등의 원인이 되어 기기에 나쁜 영향을 미친다. 따라서 전기기기 설계에서는 무부하 정격전압에서의 파형율을 기준치 이하로 억제하도록 규정되어 있다[1]. 고조파는 주로 슬롯에 의한 퍼미언스 리플, 기자력 고조파, 철심의 포화 등에 의해서 일어난다. 그러나 퍼미언스법에 의한 일반적인 설계방법으로는 고차 고조파를 정량적으로 구하기가 어렵다. 이와같은 문제를 해결하기 위해서 최근에는 유한요소법과 같은 수치해석적 방법으로 고조파를 분석하는 연구가 진행되고 있다[2, 3]. 본 논문에서는 유기전압 파형 왜형율을 권선 쇄교자속 계산에 기초하여 분석하고 이를 실제 기기에서의 실험치와 비교하고자 한다. 해석 방법은 회전자의 이동을 고려한 2차원 유한요소법을 적용하여[4, 5] 무부하 정격전압에서 발전기 각 위치마다 1차권선 쇄교자속 및 유기전압을 구한 후 이것을 DFT (Discrete Fourier Transform)로 처리하여[6] 유기전압 고조파 및 파형왜형율을 계산하였다.

4극 150 KW 돌극형 동기발전기로서 발전기 사양은 Table I과 같다. 여자전류는 회전자와 같은 축에 연결된 excitor로부터 유기되는 교류전류(210 Hz)를 3상 전파 정류로 정류하여 계자에 공급된다.

Table I. Specifications of generator

	Stator	Rotor
Air gap [mm]		2.5
Frequency [Hz]		60
Number of Poles		4
Number of Phases		3
Number of Slots	48	-
Inner Dia. / Outer Dia [mm]	341 / 500	110 / 336
Core length [mm]	230	230
Materials	S-18 (stator, rotor) S-45C (shaft)	

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

## II. 해석 방법

### 1. 해석 모델

본 논문에서 해석 대상으로 한 기기는 3상 AC 380 V

### 2. 유한요소 해석

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

- 1) 계자전류는 축방향으로만 흐른다.

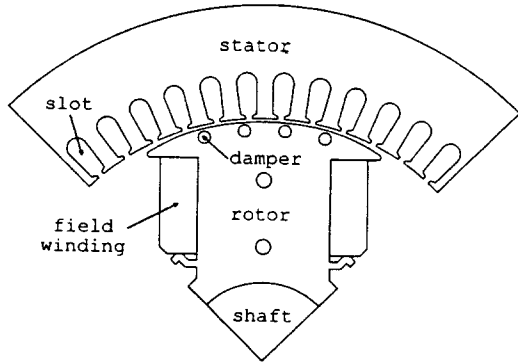


Fig. 1. Analysis model of generator (1 pole)

- 2) 고정자 및 회전자에 흐르는 와전류는 무시한다.
- 3) 무부하 정상상태만 고려하므로 계동권선에서의 전류는 무시한다.

이때의 전자계 지배방정식은 maxwell 방정식으로 부터 변위전류를 무시하면 다음과 같이 주어진다[7].

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

여기서  $A$ 는 자기벡터 포텐셜,  $\mu$ 는 자기투자율,  $J$ 는 계자권선에 흐르는 전류밀도이다. 해석영역을 유한개의 삼각형 요소로 분할한 후 식(1)을 galerkin법에 의해 정리하면 시각  $t$ 에서 각 요소에서의 이산화된 요소방정식은 다음과 같이 구할수 있다[7].

$$[K^e]' [A]' = [F^e]' \quad (2)$$

여기서,

$$K_{ij}^e = \int_S \frac{1}{\mu^e} \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy$$

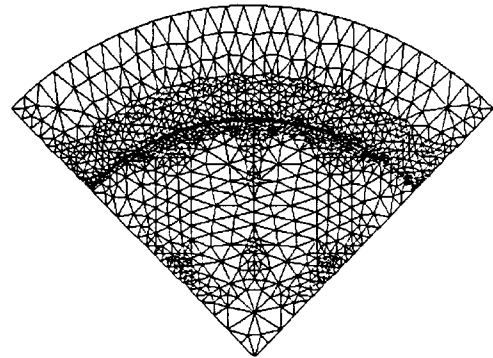
$$F_i^e = \int_S N_i \cdot J dx dy \text{ 이다.}$$

식 (2)를 전체 요소에 대해 구하여 조립하면 식 (3)과 같은 시스템 방정식을 구할 수 있다.

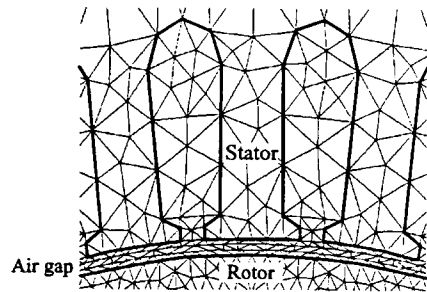
$$[K]' [A]' = [F]' \quad (3)$$

여기서  $[K]$ 는 절점의 위치와 투자율에 관계된 계수행렬,  $[F]$ 는 전류밀도에 관련된 구동행렬이다. 한편, 벡터

포텐셜  $A'$ 는 시각  $t$ 에서의 투자율  $\mu'$ 에 의존하므로 newton-raphson법에 의하여 비선형 해석을 하였다. Fig. 2는 해석 영역의 요소분할도 및 공극부분의 요소를 확대한 것이다.



(a) Finite elements in the analysis region



(b) Finite elements in the air gap

Fig. 2. Finite elements discretization

회전에 의해 요소의 왜형이 생기면 해의 오차가 발생하므로 본 연구에서는 공극을 3층으로 나누고 가운데 층을 moving band[4, 5]로 두고 회전할 때마다 이 moving band내에서의 요소만 재분할하도록 하였다. 또한 moving band내에서의 요소분할은 1극분(90°)당 100등분 즉, 0.9°로 세분하여 회전에 따르는 요소의 왜형을 최소화 되게 하였다. Fig. 3은 회전자가 이동할 때 moving band내에서의 요소 재분할 과정을 나타내었다.

무부하 정상상태에서는 자속의 분포가 고정자의 1 슬롯 피치만큼 이동할 때마다 동일하게 반복되므로 회전자가 1 슬롯 피치 이동하는 동안만 해석하여도 1주기동안의 자속분포를 해석할 수 있다. 본 해석에서는 고정자의 1 슬롯 피치가 기계각으로 7.5°이며, 회전자는 고정자의 1 슬롯 피치의 1/10만큼의 거리씩 이동할 때마다 자속분포를 해

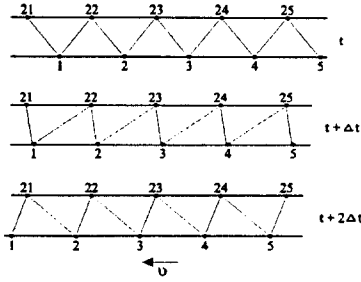
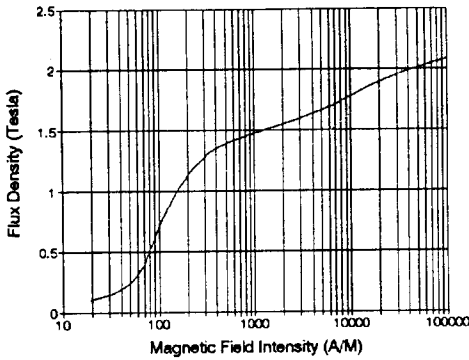
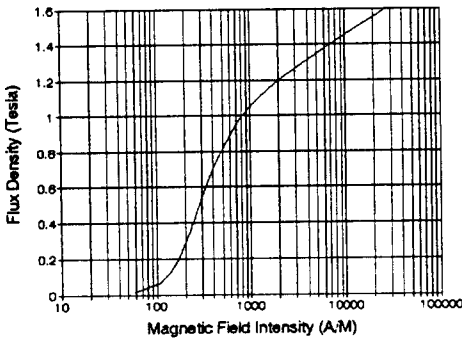


Fig. 3. Discretization process in the moving band[4]

석하였다. 발전기 고정자 및 회전자에 사용된 철심은 S-18, shaft 재료는 S-45 C이며 각각의 B-H 특성곡선은 Fig. 4와 같다.



(a) B-H characteristic curve of S-18

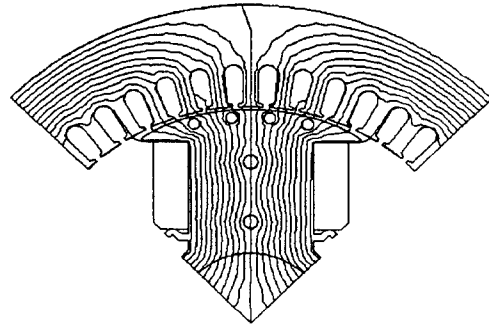


(b) B-H characteristic curve of S-45C

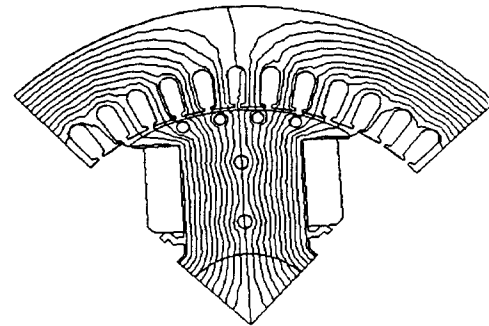
Fig. 4. Characteristic curves of materials

Fig. 5는 회전자의 초기위치 및 1/2 슬롯 피치 만큼 반

시계방향으로 회전했을 때의 자속 분포를 나타낸 것이다.



(a) Initial position



(b) After rotation of 1/2 slot pitch

Fig. 5. Flux line distributions

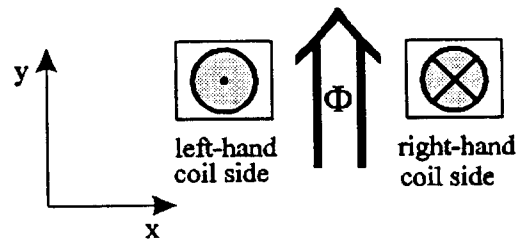


Fig. 6. Sign conventions for positive current flow in a stator coil

Fig. 6과 같이 권회수 T인 코일에 채교하는 자속량은

$$\phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}$$

로 주어지며 2차원 유한요소 해석하면 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\phi = (A_1 - A_2) \cdot l \cdot T \quad (4)$$

여기서,  $A_1$ : 왼쪽 코일변의 벡터 포텐셜 평균치  
 $A_2$ : 오른쪽 코일변의 벡터 포텐셜 평균치  
 $l$ : 코일변의 z축방향 길이이다.

그러므로 각 상의 쇄교자속량  $\Phi$ 는 식 (4)를 사용하여, 각 상에 연결된 코일에 쇄교하는 자속량의 대수적인 합으로써 구할수 있다.

시각 t에서 발전기에 유기되는 상전압  $V_p(t)$ 는 식(5)와 같이 각 상의 쇄교자속의 시간미분으로 나타낼 수 있다.

$$V_p(t) = - \frac{d\Phi^t}{dt} \quad (5)$$

식(5)의 시간미분항을 후퇴차분법으로 정리하면 시각  $t + \Delta t$ 에서 각 상의 유기전압은 다음과 같이 정리된다.

$$V_p(t + \Delta t) = - \frac{\Phi(t + \Delta t) - \Phi(t)}{\Delta t} \quad (6)$$

이때  $\Delta t$ 는 동기속도로 고정자 슬롯 피치의 1/10만큼 회전하는 시간이다.

$$\Delta t = \frac{1/f}{N_s/2P} \times \frac{1}{10} \quad (7)$$

여기서, P: 극수 (4),  $N_s$ : 고정자 슬롯수 (48)  
 $f$ : 전원주파수 (60)

본 해석 모델은 1극당 고정자 슬롯수가 12개, 1 슬롯 피치당 회전자의 이동횟수가 10으로 1주기당 총 240개의 이산화된 유기전압 값을 얻을수 있다. 이 240개의 이산화된 유기전압 값은 고조파를 포함하고 있기 때문에 다음과 같은 DFT(Discrete Fourier Transform)을 사용하여 [6] 각 상전압의 고조파를 분석하였다.

$$V_{pk} = \left| \sum_{n=0}^{N-1} V_p(n) e^{-j2\pi nk/N} \right| \quad (k=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (8)$$

단, N: 한 주기당 이산화된 유기전압 데이터 수  
 $k$ : 고조파 차수  
 $j = \sqrt{-1}$   
 $V_{pk}$ : k차 상전압의 peak 치

또한 선간전압은 각 상 전압을 대칭으로 가정하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_l(t) = V_p(t) - V_p(t - \frac{2\pi}{3\omega}) \quad (9)$$

선간전압의 고조파도 상전압을 구하는 방법과 동일하게 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{lk} = \left| \sum_{n=0}^{N-1} V_l(n) e^{-j2\pi nk/N} \right| \quad (10)$$

( $V_{lk}$ : k차 선간전압의 peak 치)

이와같이 각 고조파 선간전압을 구한 후 파형왜형율은 다음과 같이 기본파에 대한 고조파분으로 구할 수 있다.

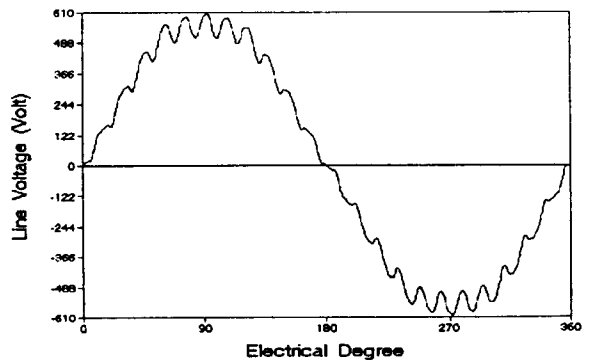
$$\text{파형왜형율} = \frac{V_{lk}^*}{V_{l1}} \times 100(\%) \quad (11)$$

단,  $V_{l1}$ 은 선간전압의 기본파 peak치로 식(10)에서

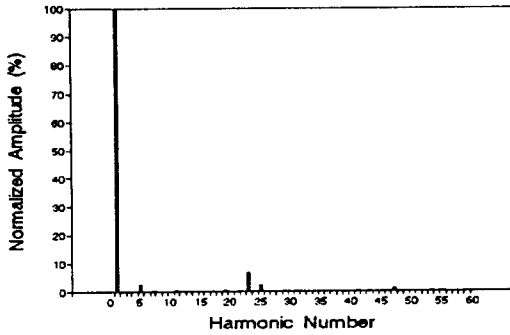
$$V_{l1} = \left| \sum_{n=0}^{N-1} V_l(n) e^{-j2\pi nk/N} \right|, \quad V_{lk}^* \text{는 선간전압의 고조파 성분으로 } V_{lk}^* = \sqrt{\sum_{k=0}^N V_{lk}^2} \text{ 이다.}$$

### III. 해석결과 및 검토

Fig. 7은 본 모델에서 사용한 발전기의 무부하 동기속도에서의 선간전압 파형 및 DFT로 분석한 결과이다. 선간전압의 실효치는 380 V<sub>rms</sub>이며 기본파에 대한 고조파는 5고조파 2.32%, 23고조파 6.14%, 25고조파 2.14%로



(a) Calculated line voltage



(b) Normalized harmonic components  
(Harmonic distortion factor = 7.06 %)

Fig. 7. Calculated line voltage and harmonics

slot 고조파의 영향이 매우 크다는 사실을 정량적으로 확인하였다. 파형 왜형율은 60고조파까지 고려하여 7.06 %로 규격치인 10 % 이내임을 확인하였다.

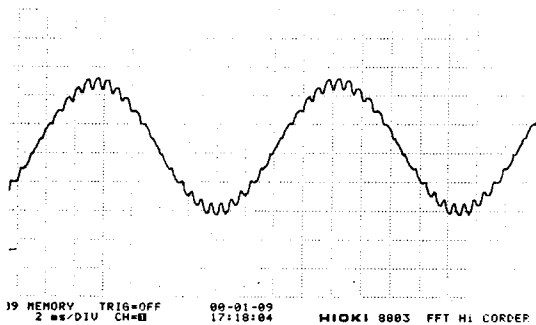


Fig. 8. Measured line voltage

Fig. 8은 무부하 동기속도에서의 선간전압을 Recorder (HIOKI 8803)로 측정된 파형이다. 선간전압 파형의 파

형 왜형율은 왜율계 (TEKTRONIX PM 500EA)로 측정된 결과 5.4%로 계산치보다 1.66% 낮게 나타났다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 돌극형 동기발전기의 무부하 동기속도에서의 유기전압을 2차원 유한요소법에 의해 구하고 이를 고조파 분석하여 파형왜형율을 구하는 방법을 제시하였다. 해석 방법으로는 회전자를 1/10 슬롯 피치씩 회전시키면서 각 위치에서 고정자 코일과 쇄교하는 자속과 유기전압을 구하고, 이를 DFT로 고조파 분석하였다. 이때 회전에 따르는 요소 재분할은 moving band를 도입하여 이동시마다 이 moving band에서만 요소를 재분할함으로써 효과적으로 처리할 수 있었다. 제안한 방법을 380V 150KW 돌극형 동기발전기에 적용하여 선간전압의 고조파를 정량적으로 분석하고 이를 근거로 파형 왜형율을 계산하였다. 분석결과 슬롯 고조파에 대한 영향이 파형 왜형율에 가장 크게 작용함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 電氣學會 電氣規格調査會標準規格 JEC-114 同期機, (1964).
- [2] K. Ide, et al., IEEE Trans. Magn., **28**, 1359 (1992).
- [3] 三上浩幸 外 4人, 電學回轉機研資, RM-94-45, 57 (1994).
- [4] B. Davat, Z. Ren and M. Lajoie-Mazenc, IEEE Trans. Magn., **21(6)**, 2296 (1985).
- [5] N. Sadowski, et al., IEEE Trans. Magn., **28**, (2), 1410 (1992).
- [6] R. C. Dorf, Electrical Engineering HandBook, CRC Press, (1993).
- [7] 中田高義, 高橋則雄, 電氣工學の有限要素法, 森北出版 株式會社, 東京, (1991).

# Harmonic Analysis of Output Voltage in Synchronous Generator Taking Account of the Rotor Movement

Dal-Ho Im, Chang-Eob Kim

*Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University*

*Haengdang-Dong 17, Sungdong-Gu, Seoul 133-791*

Yong-Bae Jung

*R & D Institute, Hyosung Industries Co., Ltd.*

*4, 5-Ka Dangsang-Dong, Yeongdeungpo-Gu, Seoul 150-045*

(Received 20 February 1995, in final form 15 April 1995)

We propose an analyzing method of the harmonics of output voltage in salient pole synchronous generator. In simulation, 2-D finite element method is used for calculating the stator coil flux linkage considering the rotor movement. As an application of the proposed method, we calculated the harmonics of output voltage in the 150 kw class synchronous generator and compared it with the experimental result.